21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

模拟电子技术基础
学习指导与习题分析

主　编　李大军　唐　颖



内 容 简 介

本书是电子类专业及其相关专业"模拟电子技术基础"课程配套的学习指导与习题分析，体系完整亦可独立使用。本书符合教育部高等学校电子工程与电气信息工程基础课程教学指导分委员会制定的高等学校"模拟电子技术基础课程教学基本要求"，完全针对应用型本科教学的规律和特点编写而成。

本书具有如下特点：力求全面概括"模拟电子技术基础"课程的基本内容及典型例题，可配合各种不同的教材使用，适用于不同的院校；为提高分析问题和解决问题的能力，对习题从解题思路和方法上作了较为全面的分析；综合测试题选自近年来不同院校的试卷，能够帮助读者全面掌握整个课程的知识。

本书适合作为普通高等院校电子工程、电气自动化、通信工程、自动控制、机电工程和仪器仪表等专业学生的学习辅导用书，也可作为教师的教学参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础学习指导与习题分析/李大军，唐颖主编.—北京：北京大学出版社，2015.3
（21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材）
ISBN 978-7-301-25507-0

Ⅰ.①模…　Ⅱ.①李…②唐…　Ⅲ.①模拟电路—电子技术—高等学校—教学参考资料
Ⅳ.①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字（2015）第031988号

书　　名　模拟电子技术基础学习指导与习题分析
著作责任者　李大军　唐　颖　主编
责 任 编 辑　程志强
标 准 书 号　ISBN 978-7-301-25507-0
出 版 发 行　北京大学出版社
地　　址　北京市海淀区成府路205号　100871
网　　址　http://www.pup.cn　新浪微博：@北京大学出版社
电 子 信 箱　pup_6@163.com
电　　话　邮购部62752015　发行部62750672　编辑部62750667
印 刷 者
经 销 者　新华书店
787毫米×1092毫米　16开本　15.75印张　363千字
2015年3月第1版　2015年3月第1次印刷
定　　价　32.00元

前　　言

“模拟电子技术基础”是一门介绍半导体材料、器件、电子电路和电子技术应用等知识的基础课程。学生普遍感觉“入门难、学好更难”。为了帮助学生顺利学习“模拟电子技术基础”课程，我们编写了这本与该课程配合使用的学习辅导书，以便引导学生尽快掌握模拟电子技术方面的知识。

本书按照“模拟电子技术基础”课程的内容与次序逐章编写，除第1章外每章均分为以下4个部分。

(1)“知识要点”模块。给出每章的主要内容、知识要点、重点和难点的概念与结论。

(2)“典型例题分析”模块。通过每章精选的有代表性例题的分析求解，着重讲清解题思路、方法、步骤和过程，以便帮助学生提高分析设计模拟电路的能力并拓宽知识面。

(3)“自测题”模块。除了包含“模拟电子技术基础”常见的习题之外，还额外增加了一定数量的习题（如综合题、扩充提高题、选择题和填空题），并给出了所有习题的答案与解题思路，便于读者学习参考。

(4)“练习题”模块。包含众多院校“模拟电子技术基础”本科生和研究生入学考试中常见题目的解题过程与答案。

本书在例题和习题的选材上注重典型性、实用性和系统性，在内容的编排上由浅入深，兼顾不同层次读者的需求。

李大军负责本书全部内容的编写，同时还负责本书的统稿和定稿工作；唐颖负责内容简介和前言的编写，同时负责本书的校稿工作。

本书的编写，除了总结同类高校“模拟电子技术基础”的教学经验外，还参考了若干教材和参考书，在此对其作者致以衷心的感谢！

限于编者水平且编写时间仓促，书中难免存在不妥和疏漏之处，敬请使用本书的教师、学生和工程技术人员批评指正，以便今后不断完善！

编　者

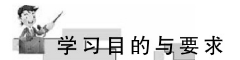
2014年11月

目　　录



第 1 章

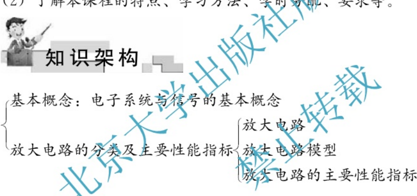
绪　　论



学习目的与要求

（1）了解本课程的性质及其在专业中的地位与作用。

（2）了解本课程的特点、学习方法、学时分配、要求等。



1.1 知识要点

1. 电子系统

电子系统是由若干相互连接、相互作用的基本电路组成的具有特定功能的电路整体，其组成框图如图 1.1 所示。

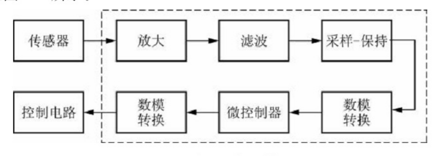


图 1.1　电子系统组成框图

2. 信号源的等效

信号源的等效电路如图 1.2 所示。

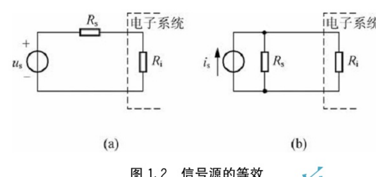


图 1.2 信号源的等效

(a) 戴维宁等效；(b) 诺顿等效

3. 信号的频谱

周期信号：只要满足狄利克雷条件都可以展开成傅里叶级数。许多周期信号的频谱都由直流分量、基波分量以及无穷多项高次谐波分量组成。

非周期信号：运用傅里叶变换可表达为一连续频率函数形式的频谱。可以用快速傅里叶变换(FFT)将非周期时间函数信号的频谱函数迅速求出。

4. 模拟信号和数字信号

按时间和幅值的连续性和离散性把信号分为以下 4 类。

(1) 时间连续、数值连续信号：模拟信号。

(2) 时间离散、数值连续信号：取样信号。

(3) 时间离散、数值离散信号：A/D 输出，数字信号(只存在高低两种电平，分别代表二元编码中的 1 和 0)。

(4) 时间连续、数值离散信号：D/A 输出。

5. 放大电路模型

1) 模拟信号放大

放大：最基本的模拟信号处理功能，构成其他功能模拟电路(滤波、振荡、稳压等)的基本单元电路。

放大的含义：放大电信号(将微弱的电信号增强到人们所需要的数值)且信号不失真(放大后的信号波形与放大前的信号波形基本相同)。

放大的本质：通过输入信号的控制，使放大电路能将直流能源的能量转化为较大的输出能量，并推动负载。

2) 放大电路模型

放大电路的表示方法如图 1.3 所示。

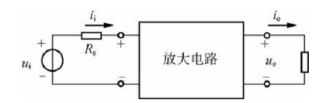


图 1.3 放大电路的表示

放大电路的 4 种类型如下所述。

(1) 电压放大电路：$u_o=A_u u_i$，A_u 为电压增益。

(2) 电流放大电路：$i_o=A_i i_i$，A_i 为电流增益。

(3) 互阻放大电路：$u_o=A_r i_i$，A_r 为互阻增益。

(4) 互导放大电路：$i_o=A_g u_i$，A_g 为互导增益。

电压放大电路模型如图 1.4 所示。

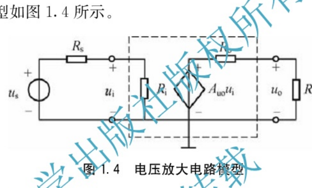


图 1.4 电压放大电路模型

A_{uo}为输出开路($R_L=\infty$)时的电压增益：

$$u_o=A_{uo}u_i\frac{R_L}{R_L+R_o}，\ u_i=u_s\frac{R_i}{R_s+R_i}，\ A_u=\frac{u_o}{u_i}=A_{uo}\frac{R_L}{R_L+R_o}$$

电压放大电路适用场合：信号源内阻 R_s 较小且负载电阻 R_L较大。

许多工业控制设备及医疗设备，采用隔离放大电路。其输入和输出之间有无公共参考点，故对内容讨论没有影响。

电流放大电路模型如图 1.5 所示。

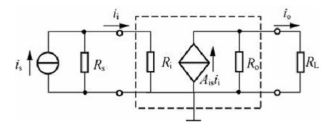


图 1.5 电流放大电路模型

A_{is}为输出短路($R_L=0$)的电流增益：

$$i_o=A_{is}i_i\frac{R_o}{R_L+R_o}，\ i_i=i_s\frac{R_s}{R_s+R_i}，\ A_i=\frac{i_o}{i_i}=A_{is}\frac{R_o}{R_L+R_o}$$

电流放大电路适用场合：信号源内阻 R_s 较大而负载电阻 R_L较小。

互阻放大和互导放大电路模型如图 1.6 所示。

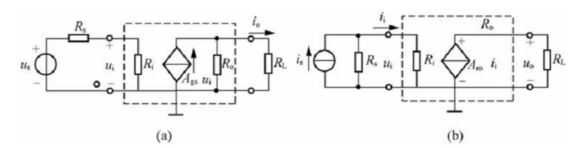


图 1.6　互阻放大和互导放大电路模型

(a) 互阻放大；(b) 互导放大

A_{ro}为输出开路时的互阻增益，A_{gs}为输出短路的互导增益。

四种电路模型相互之间可以实现任意转换。

6. 放大电路的主要性能指标

放大电路的主要性能指标有输入电阻、输出电阻、增益、频率响应及带宽、非线性失真。

放大电路的其他指标有最大输出功率、效率、信号噪声比、抗干扰能力。

1）输入电阻

输入电阻R_i的大小决定了放大电路从信号源吸取信号幅值的大小：

$$R_i=\frac{u_i}{i_i}$$

输入为电压信号的放大电路(电压放大和互导放大)，R_i越大，则放大电路输入端的u_i值越大。

输入为电流信号的放大电路(电流放大和互阻放大)，R_i越小，放大电路的输入电流i_i越大。

可假定在输入端外加一测试电压u_t，计算或测量电流i_t，则$R_i=\frac{u_t}{i_t}$。输入电阻测试图如图 1.7 所示。

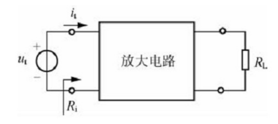


图 1.7　输入电阻测试

2）输出电阻R_o

输出电阻决定它带负载的能力。输出电阻测试图如图 1.8 所示。输出为电压信号的放大电路(电压放大和互阻放大)，R_o越小，负载电阻R_L对输出电压u_o的影响越小。多用于信号的前置放大和中间级放大。

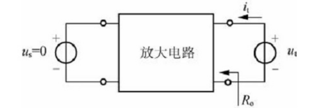


图 1.8 输出电阻测试

输出为电流信号的放大电路(电流放大和互导放大)，R_o 越大，负载电阻 R_L 对输出电流 i_o 的影响越小。通常用于电子系统的输出级。

在信号源短路($u_s=0$，保留 R_s)和负载开路的条件下，有 $R_o=\frac{u_t}{i_t}\Big|_{u_s=0,R_L=\infty}$。

放大电路的输入电阻和输出电阻不是直流电阻，而是在线性运用情况下的交流电阻。

3) 增益

对数增益，基本单位为贝尔[B]，十分之一单位分贝(dB)。

$$电压增益=20\lg|A_u|\ \mathrm{dB}$$

$$电流增益=20\lg|A_i|\ \mathrm{dB}$$

$$功率增益=10\lg A_p\ \mathrm{dB}$$

功率与电压(或电流)的平方成比例。

以对数形式表达放大电路增益的优点有：①当用对数坐标表达增益随频率变化的曲线时，可大大扩大增益变化范围；②计算多级放大电路的总增益时，可将乘法化为加法进行运算。

4) 频率响应及带宽

放大电路的频率响应：在输入正弦信号的情况下，输出随频率连续变化的稳态响应。

$$\dot{A}_u(\mathrm{j}\omega)=\frac{\dot{U}_o(\mathrm{j}\omega)}{\dot{U}_i(\mathrm{j}\omega)},\ \dot{A}_u=A_u(\omega)\angle\varphi(\omega)$$

幅频响应：$A_u(\omega)$表示电压增益的模与角频率之间的关系，放大电路的幅频响应如图 1.9 所示。

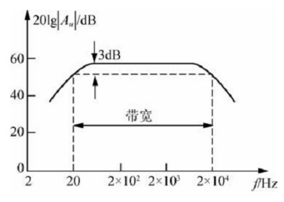


图 1.9 放大电路的幅频响应

相频响应：$\varphi(\omega)$表示放大电路输出与输入正弦电压信号的相位差与角频率之间的关系。

中频区：幅频响应中间平坦的一段。

半功率点：输入信号幅值保持不变，增益下降 3dB 的频率点(其输出功率约等于中频区输出功率的一半)。

放大电路的带宽：幅频响应的高、低两个半功率点间的频率差，$BW=f_H-f_L$，其中f_H为上限频率，f_L下限频率。

直流(直接耦合)放大电路下限频率为零。

幅度失真：放大电路对不同频率的信号增益不同。波形如图 1.10(a)所示。

相位失真：放大电路对不同频率的信号产生的相移不同。波形如图 1.10(b)所示。

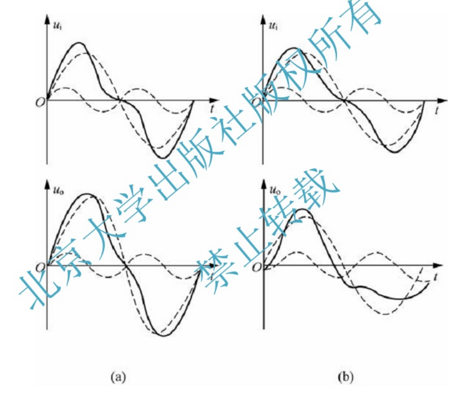


图 1.10　频率失真

(a) 幅度失真；(b) 相位失真

幅度失真和相位失真总称为频率失真，属于线性失真(线性电抗元件引起)。

5）非线性失真

非线性失真是由放大电器件的非线性特性引起的(饱和失真、截止失真)。

向放大电路输入标准的正弦波信号，可以测定输出信号的非线性失真。

非线性失真系数：
$$\gamma=\frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty}U_{ok}^2}}{U_{o1}}\times 100\%$$

式中，U_{o1}是输出电压信号基波分量的有效值；U_{ok}是高次谐波分量的有效值。



1.2 典型例题分析

例题 1：写出下列正弦波电压信号的表达式(设初始相角为零)。

(1) 峰-峰值 10V，频率 10kHz。

(2) 有效值 220V，频率 50Hz。

(3) 峰-峰值 100mV，周期 1ms。

(4) 峰-峰值 0.25V，角频率 1000rad/s。

解：正弦波电压表达式为 $u(t)=U_m\sin(\omega t+\theta)$，由于 $\theta=0°$，于是得

(1) $u(t)=5\sin(2\times10^4\pi t)$(V)。

(2) $u(t)=220\sqrt{2}\sin(100\pi t)$(V)。

(3) $u(t)=0.05\sin(2000\pi t)$(V)。

(4) $u(t)=0.125\sin(1000t)$(V)。

例题 2：主教材图 1.2.2 中的方波电压信号加在一个电阻 R 两端，试用公式 $P=\frac{1}{T}\int_0^T\frac{u^2(t)}{R}\mathrm{d}t$ 计算信号在电阻上耗散的功率；然后根据式(1.2.3)分别计算方波信号的傅里叶展开式中直流分量、基波分量、三次谐波分量在电阻上耗散的功率，并计算这 3 个分量在电阻上耗散功率之和占电阻上总耗散功率的百分比。

解：(1) 方波信号在电阻上的耗散功率为

$$P_S=\frac{1}{T}\int_0^T\frac{u^2(t)}{R}\mathrm{d}t=\frac{U_S^2}{TR}\int_0^{\frac{T}{2}}\mathrm{d}t=\frac{U_S^2}{2R}$$

(2) 可知直流分量、基波分量、三次谐波分量分别为$\frac{U_S}{2}$、$\frac{2U_S}{\pi}$、$\frac{2U_S}{3\pi}$，所以它们在电阻上的耗散功率为

直流分量为

$$P_O=\left(\frac{U_S}{2}\right)^2/R=\frac{U_S^2}{4R}$$

基波分量为

$$P_1=\left(\frac{2U_S}{\pi}\cdot\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2/R=\frac{2U_S^2}{\pi^2R}$$

三次谐波分量为

$$P_3=\left(\frac{2U_S}{3\pi}\cdot\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2/R=\frac{2U_S^2}{9\pi^2R}$$

(3) 3 个分量占电阻上总耗散功率的百分比

前三者之和为

$$P_{0\sim3}=P_0+P_1+P_3=\frac{U_S^2}{4R}+\frac{2U_S^2}{\pi^2R}+\frac{2U_S^2}{9\pi^2R}\approx0.475\,\frac{U_S^2}{R}$$

所占百分比为

$$(P_{0\sim3}/P_S)\times100\%\approx\frac{0.475U_S^2/R}{U_S^2/2R}\times100\%=95\%$$

例题 3：电压放大电路模型如主教材图 1.4.2(a)所示，设输出开路电压增益 $A_{uo}=10$。试分别计算下列条件下的源电压增益 $A_{us}=u_o/u_s$。

(1) $R_i=10R_s$，$R_L=10R_o$。 (2) $R_i=R_s$，$R_L=R_o$。

(3) $R_i=R_s/10$，$R_L=R_o/10$。(4) $R_i=10R_s$，$R_L=R_o/10$。

解：由图可知，$u_s=\frac{u_i}{R_i}(R_s+R_i)$，$u_o=\frac{R_L}{R_o+R_L}\cdot A_{uo}u_i$。所以

(1) $R_i=10R_s$，$R_L=10R_o$ 时

$$u_s=\frac{u_i}{R_i}(R_s+R_i)=\frac{11}{10}u_i$$

$$u_o=\frac{R_L}{R_o+R_L}\cdot A_{uo}u_i=\frac{10}{11}\times10u_i$$

则源电压增益为 $A_{us}=\frac{u_o}{u_s}=\frac{100u_i/11}{11u_i/10}\approx8.26$。

(2) $A_{us}=\frac{u_o}{u_s}=\frac{5u_i}{2u_i}=2.5$。

(3) $A_{us}=\frac{u_o}{u_s}=\frac{10u_i/11}{11u_i}\approx0.0826$。

(4) $A_{us}=\frac{u_o}{u_s}=\frac{10u_i/11}{11u_i/10}\approx0.826$。

例题 4：在某放大电路输入端测量到输入正弦信号电流和电压的峰-峰值分别为 5μV 和 5mV，输出端接 2kΩ 电阻负载，测量到正弦电压信号峰-峰值为 1V。试计算该放大电路的电压增益 A_u、电流增益 A_i 及功率增益 A_p，分别换算成 dB 数表示。

解：电压增益为

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=\frac{1\text{V}}{0.005\text{V}}=200，20\lg|A_u|=20\lg200\approx46\text{dB}$$

电流增益为

$$A_i=\frac{i_o}{i_i}=\frac{1\text{V}/2000\Omega}{5\times10^{-6}\text{A}}=100，20\lg|A_i|=20\lg100\approx40\text{dB}$$

功率增益为

$$A_p=\frac{P_o}{P_i}=\frac{(1\text{V})^2/2000\Omega}{5\times10^{-3}\text{V}\times5\times10^{-6}\text{A}}=20000，10\lg A_p=10\lg20000\approx43\text{dB}$$

例题 5：当负载电阻 $R_L=1\text{k}\Omega$ 时，电压放大电路输出电压比负载开路($R_L=\infty$)时输出电压减少 20%，求该放大电路的输出电阻 R_o。

解：设负载开路时输出电压为 u'_o，负载电阻 $R_L=1k\Omega$ 时输出电压为 u_o，根据题意有

$$u_o=(1-20\%)u'_o=0.8u'_o$$

由于

$$u_o/u'_o=R_L/(R_o+R_L)$$

则

$$R_o=(u_o/u'_o-1)R_L=(1/0.8-1)\times1\times10^3\Omega=250\Omega$$

例题 6：一电压放大电路输出端接 1kΩ 负载电阻时，输出电压为 1V，负载电阻断开时，输出电压上升到 1.1V，求该放大电路的输出电阻 R_o。

解：设 u'_o 为负载电阻断开时的输出电压，即 $u'_o=1.1V$；负载电阻 $R_L=1k\Omega$ 时，输出电压 $u_o=1V$。根据 $u_o/u'_o=R_L/(R_o+R_L)$，则输出电阻为

$$R_o=(u_o/u'_o-1)R_L=(1.1V/1V-1)\times1\times10^3\Omega=100\Omega$$

例题 7：某放大电路输入电阻 $R_i=1k\Omega$，如果用 1μA 电流源(内阻为∞)驱动，放大电路输出短路电流为 10mA，开路输出电压为 10V。求放大电路接 4kΩ 负载电阻时的电压增益 A_u、电流增益 A_i 及功率增益 A_p，分别换算成 dB 数表示。

解：根据题意可得输出电阻为

$$R_o=10V/(10\times10^{-3}A)=1k\Omega$$

由于放大电路开路输出电压为 $u'_o=10V$，电流信号源电流 $i_s=1\mu A$，负载电阻 $R_L=4k\Omega$，于是可得

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=\frac{u'_o\cdot R_L/(R_o+R_L)}{i_s\cdot R_i}=800dB$$

$$A_i=\frac{i_o}{i_i}=\frac{u'_o/(R_o+R_L)}{i_s}=2000dB$$

$$A_p=\frac{P_o}{P_i}=\frac{u_o^2/R_L}{i_s^2\cdot R_i}=\frac{[u'_oR_L/(R_o+R_L)]^2/R_L}{i_s^2\cdot R_i}=1.6\times10^6$$

$$10\lg A_p=10\lg(1.6\times10^6)\approx62dB$$

例题 8：有以下 3 种放大电路备用。

(1) 高输入电阻型：$R_{i1}=1M\Omega$，$A_{uo1}=10$，$R_{o1}=10k\Omega$。

(2) 高增益型：$R_{i2}=10k\Omega$，$A_{uo2}=100$，$R_{o2}=1k\Omega$。

(3) 低输出电阻型：$R_{i3}=10k\Omega$，$A_{uo3}=1$，$R_{o3}=20\Omega$。

用这 3 种放大电路组合，设计一个能在 100Ω 负载电阻上提供至少 0.5W 功率的放大器。已知信号源开路电压为 30mV(有效值)，内阻为 $R_s=0.5M\Omega$。

解：由于高输入电阻放大电路对信号源衰减小，所以输入级(第一级)宜采用高输入电阻型放大电路；低输出电阻放大电路带负载能力强，所以输出级(第三级)宜采用低输出电阻型放大电路；中间级(第二级)用高增益型。于是 3 种放大电路模型互联组成的放大电路如图 1.11 所示。

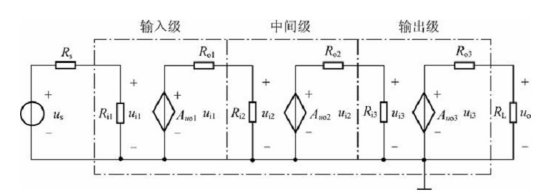


图 1.11　放大电路模型

在该放大电路中，输入信号源为 $u_s=30\text{mV}$、内阻 $R_s=0.5\text{M}\Omega$ 的电压源；前级放大电路的受控源及输出电阻是后级放大电路的信号源和内阻，而后级放大电路的输入电阻则是前级放大电路的负载电阻。设 3 个放大电路模型的输入电压分别为 u_{i1}、u_{i2}、u_{i3}，于是

$$u_{i1}=\frac{R_{i1}}{R_s+R_{i1}}\cdot u_s=0.02\text{V}$$

$$u_{i2}=\frac{R_{i2}}{R_{o1}+R_{i2}}\cdot A_{uo1}u_{i1}=0.1\text{V}$$

$$u_{i3}=\frac{R_{i3}}{R_{o2}+R_{i3}}\cdot A_{uo2}u_{i2}=\frac{100}{11}\text{V}$$

$$u_o=\frac{R_L}{R_{o3}+R_L}\cdot A_{uo3}u_{i3}=\frac{1000}{132}\text{V}$$

放大电路输出功率为

$$P_o=\frac{u^2}{R_L}=[(1000/132)^2/100]\text{W}\approx 0.574\text{W}>0.5\text{W}$$

例题 9：在电压放大电路的上限频率点，电压增益比中频区增益下降 3dB，这时在相同输入电压条件下，与中频区比较，输出电压下降到多少？

解：设输入电压为 $\dot{U}_i$；中频区输出电压为 $\dot{U}_o$，电压增益为 $\dot{A}_{uo}$；上限频率点输出电压为 $\dot{U}_H$，增益 $\dot{A}_{uH}$。依题意

$$20\lg|\dot{A}_{uH}|-20\lg|\dot{A}_{uo}|=-3\text{dB}$$

又因为

$$20\lg|\dot{A}_{uH}|-20\lg|\dot{A}_{uo}|=20(\lg|\dot{U}_H/\dot{U}_i|-\lg|\dot{U}_o/\dot{U}_i|)=20\lg\left|\frac{\dot{U}_H}{\dot{U}_o}\right|$$

所以

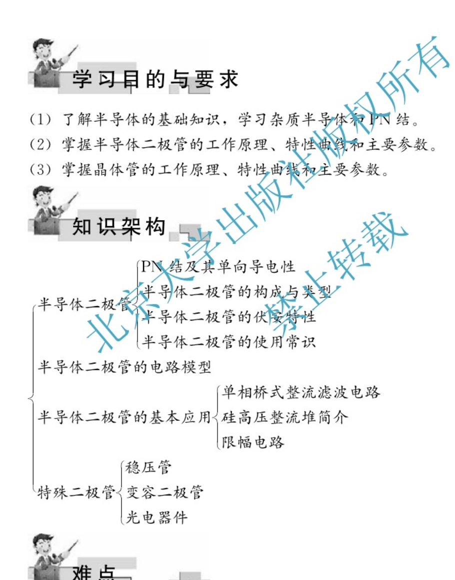
$$|\dot{U}_H|\approx 0.708|\dot{U}_o|$$

在相同输入电压条件下，上限频率点的输出电压约下降到中频区的 0.708。



第 2 章

二极管及其基本电路



学习目的与要求

(1) 了解半导体的基础知识，学习杂质半导体和 PN 结。

(2) 掌握半导体二极管的工作原理、特性曲线和主要参数。

(3) 掌握晶体管的工作原理、特性曲线和主要参数。

知识架构

- 半导体二极管
  - PN 结及其单向导电性
  - 半导体二极管的构成与类型
  - 半导体二极管的伏安特性
  - 半导体二极管的使用常识
- 半导体二极管的电路模型
- 半导体二极管的基本应用
  - 单相桥式整流滤波电路
  - 硅高压整流堆简介
  - 限幅电路
- 特殊二极管
  - 稳压管
  - 变容二极管
  - 光电器件

难点

根据 PN 结在外加电压下内部载流子的运动规律来理解 PN 结的单向导电性。



(1) 在开关电路中，判断二极管是导通还是截止的方法如下。对于单只二极管而言，首先将二极管断开，计算U_P、U_N，若$U_P>U_N$，则二极管是导通的；若$U_P<U_N$，则二极管是截止的。

(2) 对并联二极管而言，首先将二极管断开，分别计算U_{PN1}、U_{PN2}，max(U_{PN1}、U_{PN2})并且大于0，正向电压值大的二极管导通，余下的被钳位。

(3) 稳压二极管的稳压过程及稳压的工作区域。

2.1 知识要点

2.1.1 半导体基本知识

1. 半导体材料

(1) 半导体：导电性能介于导体与绝缘体之间的材料。

(2) 常用的半导体材料有以下几种。

元素半导体，如硅(Si)、锗(Ge)等。

化合物半导体，如砷化镓(GaAs)等。

掺杂半导体，如硼(B)、磷(P)、铟(In)和锑(Sb)等。

(3) 半导体的特点如下所述。

导电能力介于导体与绝缘体之间；受外界光和热的刺激时，导电能力会产生显著变化；在纯净半导体中，加入微量的杂质，导电能力急剧增强。

2. 半导体的共价键结构

Si、Ge是四价元素，其最外层原子轨道上有4个价电子，邻近原子之间由共价键连结，具有晶体结构。

3. 本征半导体、空穴及其导电作用

(1) 本征半导体：一种完全纯净的、结构完整的半导体晶体。

(2) 本征激发：$T=0\text{K}$以上时，价电子就会获得足够的随机热振动能量而挣脱共价键的束缚，成为自由电子。

(3) 空穴：本征激发价电子成为自由电子后，共价键上留下的空位。

空穴是一个带正电的粒子，其电量与电子相等，符号相反，在外加电场作用下，可以



自由地在晶体中运动，并且其和自由电子一样可以参加导电。

邻近价电子可填补到这个空位上，而在这个电子原来的位置上又留下新的空位，从而使共价键中出现一定的电荷迁移。空穴的移动方向和电子移动的方向相反。

空穴也是一种载流子，这种载流子的运动，是人们根据共价键中空穴的移动而虚拟出来的。

本征半导体中的自由电子和空穴数相等。

4. 杂质半导体

(1) P型半导体：在硅(或锗)的晶体内掺入少量三价元素杂质，如硼、铟，它与周围硅原子组成共价键时，因缺少一个电子，而在晶体中产生一个空穴。

P型半导体中多数载流子是空穴，少数载流子是电子(本征激发产生)。

当相邻共价键上的电子受到热振动或在其他激发条件下获得能量时，就有可能填补这个空位，使硼原子成为不能移动的负离子，而原来硅原子的共价键则因缺少一个电子而形成空穴，从而使半导体呈中性。

(2) N型半导体：在硅或锗的晶体中掺入五价元素，如磷、砷、锑，它的5个价电子中有4个与周围的硅原子结成共价键，多余的一个价电子在室温下就成为自由电子，从而使杂质原子变成带正电荷的离子。由于杂质原子可以提供电子，故称为施主原子。

在N型半导体中多数载流子是电子，而空穴仅为少数载流子。

2.1.2　PN结的形成及其特性

1. PN结的形成

在同一块半导体中，一边掺杂成N型，另一边掺杂成P型，在N型、P型半导体的交界面上形成PN结。→P区和N区载流子因多子浓度差引起多子向对方扩散，P区留下了带负电的杂质离子，N区留下了带正电的杂质离子，集中在P区和N区交界面附近。→扩散产生空间电荷区(耗尽区)和内电场(从带正电的N区指向带负电的P区)。→内电场阻止多子扩散，促使少子漂移，漂移运动使空间电荷区变窄。→内电场削弱，扩散加强。→扩散与漂移达到动态平衡形成PN结。

接触电位差：PN结空间电荷区N区的电位比P区高，其差值用U_0表示。

2. PN结的单向导电性

(1) PN结正偏：外加正向电压(P区接正极、N区接负极)后，外加电场与PN结内电场方向相反，U_F称为正向电压。P区中的多数载流子空穴向PN结移动，和原来的一部分负离子中和，使P区的空间电荷量减少。N区电子进入PN结时，中和了部分正离子，使N区的空间电荷量减少。空间电荷区变窄，内电场减弱。此时扩散大于漂移，多子扩散形成了大的正向电流I_F，如图2.1所示。

外加电压U_F稍有变化(如0.1V)，便能引起电流的显著变化。

由少数载流子形成的漂移电流，其方向与扩散电流相反，数值很小，可忽略不计。

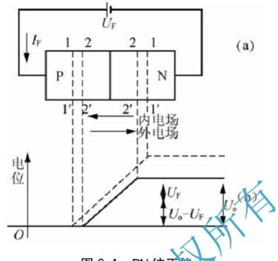


图 2.1　PN 结正偏

(2) PN 结反偏：外加反向电压(P 区接负、N 区接正)后，电场方向与 PN 结内电场方向相同，P 区中的空穴和 N 区中的电子都将进一步离开 PN 结。空间电荷区变宽，内电场增强，多数载流子就很难越过势垒，扩散电流趋近于零。此时漂移大于扩散，少子漂移形成了很小的反向电流 I_R(一般为微安数量级)。I_R几乎与外加电压U_R无关，如图 2.2 所示。

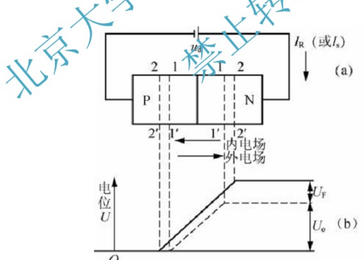


图 2.2　PN 结反偏

在一定温度 T 下，热激发产生的少数载流子数一定，电流值趋于恒定。这时的反向电流 I_R就是反向饱和电流，用 I_s 表示。I_s 受温度的影响较大。

PN 结的正向电阻很小，反向电阻很大，具有单向导电性。

(3) PN 结的伏安特性，如图 2.3 所示。

PN 电流：$i_D=I_s(e^{\frac{u_D}{nU_T}}-1)$，其中 U_T为温度的电压当量，$U_T=kT/q$，k 为波耳兹曼



常数(1.38×10^{-23}J/K)，T 为热力学温度即绝对温度，q 为电子电荷(1.6×10^{-19}C)，$n=1\sim2$，为发射系数，与 PN 结尺寸、材料和通过的电流有关。在 $T=300$K 时，$U_T\approx26$mV。正向时 $u_D>0$，且 $u_D>U_T$时，$i_D=I_s e^{\frac{u_D}{nU_T}}$；反向时 $u_D<0$，且 $|u_D|>U_T$ 时，$i_D\approx-I_s\approx0$A。

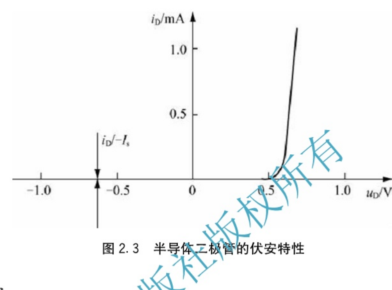


图 2.3　半导体二极管的伏安特性

3. 反向击穿

反向击穿(电击穿)：当反向电压的绝对值达到 U_{BR}(反向击穿电压)时，反向电流会突然增大，如图 2.4 所示。在反向电流很大的变化范围内，二极管两端电压几乎不变。电击穿过程是可逆的。

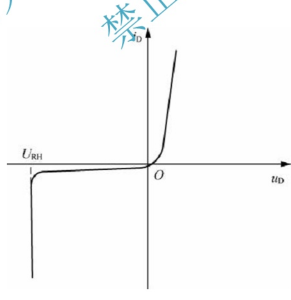


图 2.4　反向击穿

热击穿：PN 结电击穿后电流很大，电压又很高，容易使 PN 结发热，超过它的耗散功率后会发生热击穿。PN 结的电流和温升之间出现恶性循环，从而可能会把 PN 结烧毁。电击穿包括雪崩击穿和齐纳击穿两种。

2.1.3　二极管基本知识

1. 二极管的结构

二极管主要有两种结构，分别是点接触型二极管和面接触型二极管。点接触型二极管：极间电容很小，不能承受高的反向电压和大的电流，可用作小电流整流、高频检波及开关管。面接触型二极管：PN结面积大，可承受较大的电流，极间电容也大，适用于整流，而不宜用于高频电路中。

2. 二极管的 $V-I$ 特性

二极管的 $V-I$ 特性和PN结的 $V-I$ 特性基本相同。二极管的 $V-I$ 特性曲线如图2.5所示。

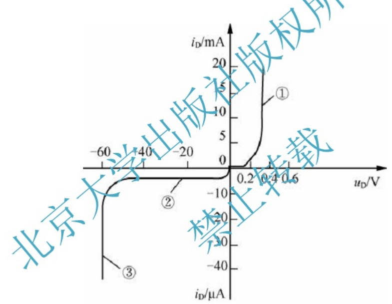


图2.5　二极管的 $V-I$ 特性

（1）正向特性：第①段为正向特性，正向电压大于 U_{th} 时，内电场大为削弱，电流迅速增长，正向电阻很小。硅管的门槛电压 U_{th}（又称死区电压）约为0.5V，锗管的 U_{th} 约为0.1V。

（2）反向特性：反向饱和电流很小，如图中第②段所示，一般硅管的反向电流比锗管小得多。温度升高时，由于少数载流子增加，反向电流将随之明显增加。

（3）反向击穿特性：当反向电压增加到一定大小时，反向电流急剧增加，这称为二极管的反向击穿，对应于第③段，原因和PN击穿相同。

3. 二极管的主要参数

（1）最大整流电流 I_F：二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流，由PN结的结面积和外界散热条件决定。超过此值，会烧坏二极管。

（2）最大反向工作电压 U_R：二极管使用时所允许加的最大反向电压，超过此值二极



管就有发生反向击穿的危险。通常取反向击穿电压的一半作为U_R。

(3) 反向电流 I_R：二极管击穿时的反向电流值。此值越小，二极管的单向导电性越好。

2.1.4　二极管基本电路及分析方法

二极管电路的常用简化模型分析法如下所述。

(1) 理想模型：理想二极管在正向偏置时，其管压降为0V，反向偏置时，它的电阻为无穷大，电流为零。

(2) 恒压降模型：当二极管导通后，认为其管压降恒定，即不随电流而变(硅管典型值为0.7V)。此模型提供了合理的近似，因此应用较广。当二极管的电流i_D等于或大于1mA时才是正确的。

在分析二极管电路时，若要判断二极管处于导通状态还是截止状态，可以先将二极管断开，然后观察(或经过计算)二极管阳、阴两极间是正向电压还是反向电压，若是前者则二极管导通，否则二极管截止。

2.1.5　特殊二极管

稳压管又称齐纳二极管，是一种用特殊工艺制造的面接触型硅半导体二极管。

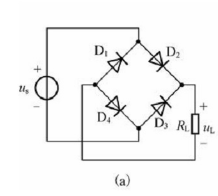
U_Z表示稳压管的反向击穿电压，即稳定电压，低的为3V，高的可达300V，它的正向压降约为0.6V。

稳压管的稳压作用在于，电流增量ΔI_Z很大时，也只引起很小的电压变化ΔU_Z。

曲线越陡，动态电阻$r_Z=\dfrac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$越小，稳压管的稳压性能越好。

2.2　典型例题分析

例题 1：电路如图2.6(a)所示，电源u_s为正弦波电压，试绘出负载R_L两端的电压波形，设二极管是理想的。



(a)　(b)

图 2.6　例题 1 图

解：由于二极管是理想的，所以无正向导通压降。根据二极管的单向导电性，$u_s>0$时，D_2、D_4导通，$u_L=u_s$；$u_s<0$时，D_1、D_3导通，$u_L=-u_s$。故u_L波形如图2.6(b)所示。

例题2：电路如图2.7(a)所示：①利用硅二极管恒压降模型求电路的I_D和U_o的值($U_D=0.7V$)；②在室温(300K)的情况下，利用二极管的小信号模型求u_o的变化范围。

解：(1) 求二极管的电流和电压：

$$I_D=\frac{U_{DD}-2u_D}{R}=\frac{(10-2\times0.7)\text{V}}{1\times10^3\Omega}=8.6\times10^{-3}\text{A}=8.6\text{mA}$$

$$U_o=2U_D=2\times0.7\text{V}=1.4\text{V}$$

(2) 求u_o的变化范围。

小信号模型等效电路如图2.7(b)所示，温度$T=300\text{K}$。

$$r_d=\frac{U_T}{I_D}=\frac{26\text{mV}}{8.6\text{mV}}\approx3.02\Omega$$

当$r_{d_1}=r_{d_2}=r_d$时，则

$$\Delta u_o=\Delta U_{DD}\frac{2r_d}{R+2r_d}=\pm1\text{V}\frac{2\times3.02\Omega}{(1000+2\times3.02)\Omega}=\pm6\text{mV}$$

u_o的变化范围为$(U_o-\Delta u_o)\sim(U_o+\Delta u_o)$，即1.394～1.406V。

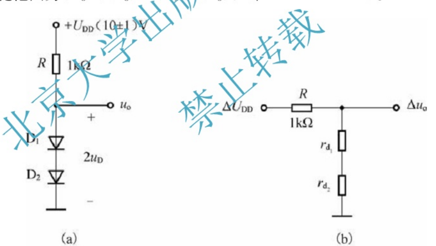


图2.7　例题2图

例题3：在图2.7的基础上，输出端外接一负载$R_L=1\text{k}\Omega$时，问输出电压的变化范围是多少？

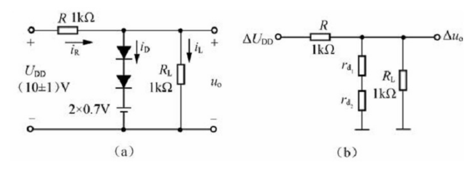


图2.8　例题3图



解：外接R_L后，图 2.7 的恒压降等效电路及小信号模型等效电路分别如图 2.8(a)和(b)所示。由图 2.8(a)求得

$$I_L=\frac{2\times0.7\text{V}}{R_L}=1.4\text{mA},\ I_D=I_R-I_L=\frac{(10-2\times0.7)\text{V}}{R}-1.4\text{mA}=7.2\text{mA}$$

$$U_o=2\times0.7\text{V}=1.4\text{V},\ r_d=\frac{V_T}{I_D}=\frac{26\text{mV}}{7.2\text{mA}}\approx3.6\Omega$$

图 2.8(b)求得：$\Delta u_o\approx\pm7\text{mV}$

u_o的变化范围是：$(U_o-\Delta u_o)\sim(U_o+\Delta u_o)$，即 1.393V～1.407V。

例题 4：二极管电路如图 2.9 所示，试判断图中的二极管是导通还是截止，并求出 AO 两端电压U_{AO}。设二极管是理想的。

解：图 2.9(a)：将 D 断开，以 O 点为电位参考点，D 的阳极电位为－6V，阴极电位为－12V，故 D 处于正向偏置而导通，$U_{AO}=-6\text{V}$。

图 2.9(b)：D 的阳极电位为－15V，阴极电位为－12V，D 被反向偏置而截止，$U_{AO}=-12\text{V}$。

图 2.9(c)：D_1阳极电位为 0V，阴极电位为－12V，故D_1导通，此后使D_2的阴极电位为 0V，而其阳极为－15V，故D_2反偏截止，$U_{AO}=0\text{V}$。

图 2.9(d)：D_1阳极电位为 12V，阴极电位为 0V，D_2阳极电位为 12V，阴极电位为－6V，故D_2更易导通，此后使$U_A=-6\text{V}$，D_1反偏而截止，故$U_{AO}=-6\text{V}$。

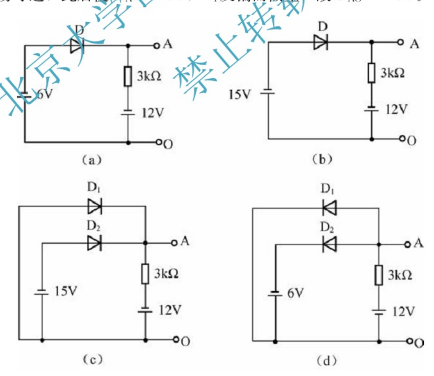


图 2.9 例题 4 图

例题 5：试判断图 2.10 中二极管是导通还是截止，为什么？

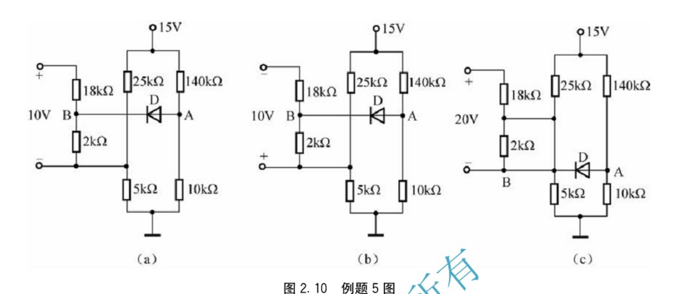


图 2.10　例题 5 图

解：图 2.10(a)：将 D 断开，以"地"为电位参考点，这时有

$$U_A=\frac{10\text{k}\Omega}{(140+10)\text{k}\Omega}\times 15\text{V}=1\text{V}$$

$$U_B=\frac{2\text{k}\Omega}{(18+2)\text{k}\Omega}\times 10\text{V}+\frac{5\text{k}\Omega}{(25+5)\text{k}\Omega}\times 15\text{V}=3.5\text{V}$$

D 被反偏而截止。

图 2.10(b)：将 D 断开，以"地"为参考点，有

$$U_A=\frac{10\text{k}\Omega}{(140+10)\text{k}\Omega}\times 15\text{V}=1\text{V}$$

$$U_B=\frac{2\text{k}\Omega}{(18+2)\text{k}\Omega}\times(-10\text{V})+\frac{5\text{k}\Omega}{(25+5)\text{k}\Omega}\times 15\text{V}=1.5\text{V}$$

D 被反偏而截止。

图 2.10(c)：将 D 断开，以"地"为参考点，有

$$U_A=\frac{10\text{k}\Omega}{(140+10)\text{k}\Omega}\times 15\text{V}=1\text{V}$$

$$U_B=\frac{-2\text{k}\Omega}{(18+2)\text{k}\Omega}\times 20\text{V}+\frac{5\text{k}\Omega}{(25+5)\text{k}\Omega}\times 15\text{V}=0.5\text{V}$$

D 被正偏而导通。

例题 6：二极管电路如图 2.11(a)所示，设输入电压 $u_i(t)$波形如图 2.11(b)所示，在 $0<t<5\text{ms}$ 的时间间隔内，试绘出 $u_o(t)$的波形，设二极管是理想的。

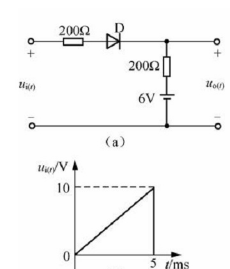
解：$u_i(t)<6\text{V}$ 时，D 截止，$u_o(t)=6\text{V}$；

$u_I(t)\geqslant 6\text{V}$ 时，D 导通。

$$u_o(t)=\frac{U_i(t)-6\text{V}}{(200+200)\Omega}\times 200\Omega+6\text{V}=\frac{1}{2}u_i(t)+3\text{V}$$

$u_I(t)=10\text{V}$ 时，$u_o(t)=8\text{V}$。$u_o(t)$的波形如图 2.11(c)所示。





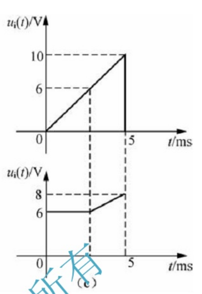


图 2.11　例题 6 图

例题 7：使用恒压降模型，重复例题 6。

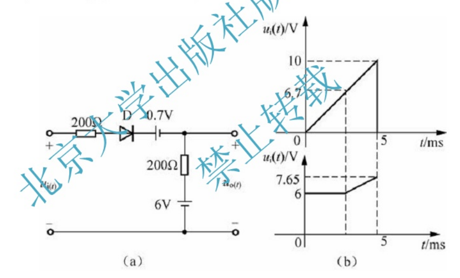


图 2.12　例题 7 图

解：图 2.11(a)电路的恒压降等效电路如图 2.12(a)所示。

$u_i(t)<6.7\text{V}$ 时，D 截止，$u_o(t)=6\text{V}$；$u_i(t)\geqslant 6.7\text{V}$ 时，D 导通，

$$u_o(t)=\frac{u_i(t)-6\text{V}-0.7\text{V}}{200\Omega+200\Omega}\times 200\Omega+6\text{V}=\frac{1}{2}u_i(t)+2.65\text{V}$$

$u_i(t)=10\text{V}$ 时，$u_o(t)=7.65\text{V}$。u_o波形如图 2.12(b)所示。

例题 8：电路如图 2.13(a)所示，D_1、D_2为硅二极管，当 $u_i=6\sin\omega t$(V)时，试用恒压降模型绘出输出电压 u_o的波形。

解：恒压降等效电路如图 2.13(b)所示。

当 $0<|u_i|<3.7\text{V}$ 时，D_1、D_2均截止，$u_o=u_i$；

当 $u_i\geqslant 3.7\text{V}$ 时，D_1导通，D_2截止，$u_o=3.7\text{V}$；

当 $u_i \leqslant -3.7\text{V}$ 时，D_2 导通，D_1 截止，$u_o = -3.7\text{V}$。

u_i 与 u_o 波形如图 2.13(c)所示。

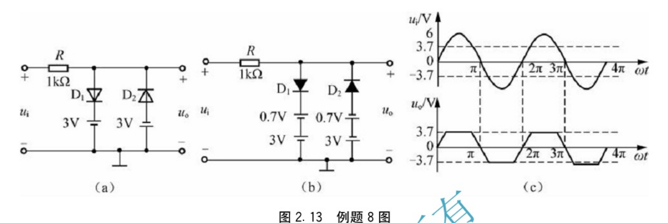


图 2.13　例题 8 图

例题 9：电路如图 2.14 所示，所有稳压管均为硅管，稳定电压 $U_z = 8\text{V}$，设 $u_i = 15\sin\omega t\ \text{V}$，试绘出 u_{o1} 和 u_{o2} 的波形。

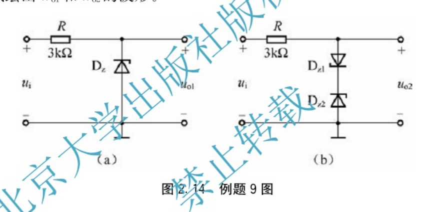


图 2.14　例题 9 图

解：图 2.14(a)所示电路，$-0.7\text{V} < u_i < U_z(=8\text{V})$ 时，D_z 截止，$u_{o1} = u_i$；$u_i \geqslant U_z$ 时，D_z 反向击穿，$u_{o1} = U_z = 8\text{V}$；$u_i \leqslant -0.7\text{V}$ 时，D_z 正向导通，$u_{o1} = -0.7\text{V}$。u_{o1} 的波形如图 2.15(a)所示。

图 2.14(b)电路，$(-U_z - 0.7\text{V}) < u_i < (U_z + 0.7\text{V})$ 时，D_{z1} 和 D_{z2} 总有一个是截止的，$u_{o2} = u_i$；$u_i \geqslant (U_z + 0.7\text{V})$ 时，D_{z1} 正向导通，D_{z2} 反向击穿，$u_{o2} = U_z + 0.7\text{V} = 8.7\text{V}$；$u_i \leqslant -(U_z - 0.7\text{V}) = -8.7\text{V}$ 时，D_{z1} 反向击穿，D_{z2} 正向导通，$u_{o2} = -U_z - 0.7\text{V} = -8.7\text{V}$。则 u_{o2} 的波形如图 2.15(b)所示。

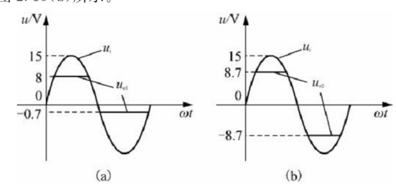


图 2.15　u_{o2} 的波形图



2.3　自　测　题

自测题一：判断下列说法是否正确。

（1）在N型半导体中如果掺入足够量的三价元素，可将其改型为P型半导体。　（　　）

（2）因为N型半导体的多子是自由电子，所以它带负电。　（　　）

（3）PN结在无光照、无外加电压时，结电流为零。　（　　）

解：（1）√　（2）×　（3）√

自测题二：选择正确答案填入空内。

（1）PN结加正向电压时，空间电荷区将______。

A. 变窄　　B. 基本不变　　C. 变宽

（2）在本征半导体中加入______元素可形成N型半导体，加入______元素可形成P型半导体。

A. 五价　　B. 四价　　C. 三价

（3）设二极管的端电压为U，则二极管的电流方程是______。

A. $I_S e^U$　　B. $I_S e^{U/U_T}$　　C. $I_S(e^{U/U_T}-1)$

（4）当温度升高时，二极管的反向饱和电流将______。

A. 增大　　B. 不变　　C. 减小

（5）稳压管的稳压区是其工作在______。

A. 正向导通　　B. 反向截止　　C. 反向击穿

解：（1）A　（2）A，C　（3）C　（4）A　（5）C

自测题三：分析计算题。

（1）写出图2.16所示各电路的输出电压值，设二极管导通电压$U_D=0.7V$。

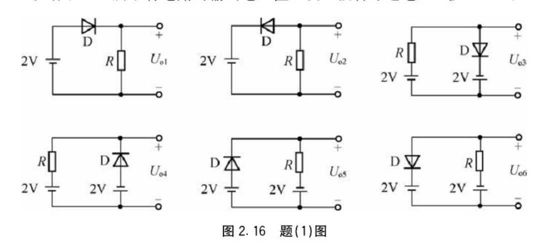


图2.16　题(1)图

解：$U_{o1}\approx1.3V$，$U_{o2}=0$，$U_{o3}\approx-1.3V$，$U_{o4}\approx2V$，$U_{o5}\approx1.3V$，$U_{o6}\approx-2V$。

（2）已知稳压管的稳压值$U_Z=6V$，稳定电流的最小值$I_{Zmin}=5mA$。求图2.17所示电路中U_{o1}和U_{o2}。



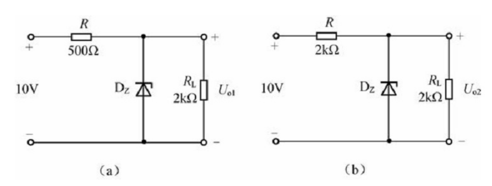


图 2.17 题(2)图

解：$U_{o1}=6V$，$U_{o2}=5V$。



2.4 练 习 题

(1) 能否将 1.5V 的干电池以正向接法接到二极管两端？为什么？

(2) 电路如图 2.18 所示，已知 $u_i=10\sin\omega t$(V)，试画出 u_i 与 u_o 的波形。设二极管正向导通电压可忽略不计。

(3) 电路如图 2.19 所示，已知 $u_i=5\sin\omega t$(V)，二极管导通电压 $U_D=0.7V$。试画出 u_i 与 u_o 的波形，并标出幅值。

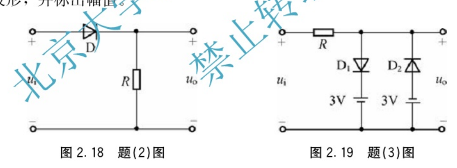


图 2.18 题(2)图　　图 2.19 题(3)图

(4) 电路如图 2.20(a)所示，其输入电压 u_{i1} 和 u_{i2} 的波形如图 2.20(b)所示，二极管导通电压 $U_D=0.7V$。试画出输出电压 u_o 的波形，并标出幅值。

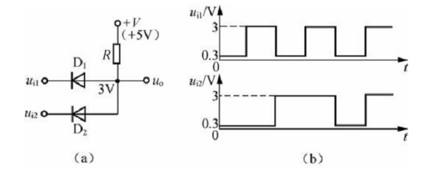


图 2.20 题(4)图

（5）电路如图 2.21 所示，二极管导通电压 $U_D=0.7\text{V}$，常温下 $U_T\approx 26\text{mV}$，电容 C 对交流信号可视为短路；u_i为正弦波，有效值为 10mV。试问二极管中流过的交流电流有效值为多少？

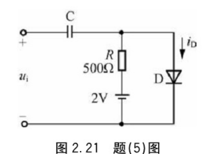


图 2.21　题(5)图

（6）现有两只稳压管，它们的稳定电压分别为 6V 和 8V，正向导通电压为 0.7V。试问：

① 若将它们串联相接，则可得到几种稳压值？各为多少？

② 若将它们并联相接，则又可得到几种稳压值？各为多少？

（7）已知稳压管的稳定电压 $U_Z=6\text{V}$，稳定电流的最小值 $I_{Z\min}=5\text{mA}$，最大功耗 $P_{ZM}=150\text{mW}$。试求图 2.22 所示电路中电阻 R 的取值范围。

（8）已知图 2.23 所示电路中稳压管的稳定电压 $U_Z=6\text{V}$，最小稳定电流 $I_{Z\min}=5\text{mA}$，最大稳定电流 $I_{Z\max}=25\text{mA}$。①分别计算 U_i为 10V、15V、35V 这 3 种情况下输出电压 U_o的值；②若 $U_i=35\text{V}$ 时负载开路，则会出现什么现象？为什么？

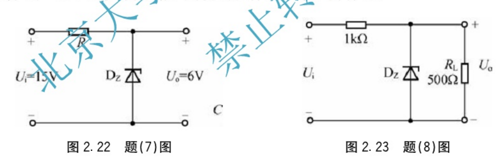


图 2.22　题(7)图　　　　图 2.23　题(8)图

（9）电路如图 2.24(a)、(b)所示，稳压管的稳定电压 $U_Z=3\text{V}$，R 的取值合适，u_i的波形如图 2.24(c)所示。试分别画出 u_{o1}和 u_{o2}的波形。

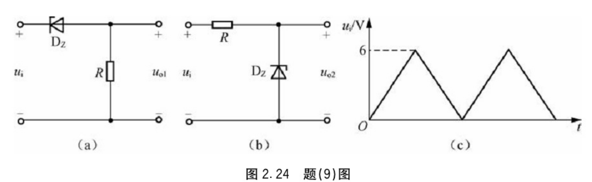


图 2.24　题(9)图

练习题答案

（1）解：不能。因为二极管的正向电流与其端电压成指数关系，当端电压为1.5V时，二极管会因电流过大而烧坏。

（2）解：u_i和u_o的波形如图2.25所示。

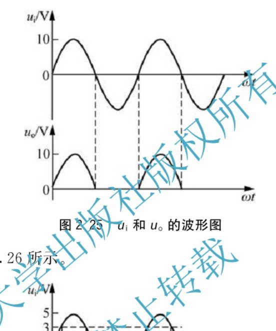


图2.25　u_i和u_o的波形图

（3）解：波形如图2.26所示。

图2.26　题(3)图

（4）解：u_o的波形如图2.27所示。

（5）解：二极管电流：$I_D=(U-U_D)/R=2.6\text{mA}$；动态电阻：$r_D\approx U_T/I_D=10\Omega$；故动态电流有效值：$I_D=U_i/r_D\approx 1\text{mA}$。

（6）解：①两只稳压管串联时可得1.4V、6.7V、8.7V和14V这4种稳压值。

②两只稳压管并联时可得0.7V和6V等两种稳压值。

（7）解：稳压管的最大稳定电流为

$$I_{ZM}=P_{ZM}/U_Z=25\text{mA}$$

电阻R的电流为$I_{ZM}\sim I_{Z\min}$，所以其取值范围为





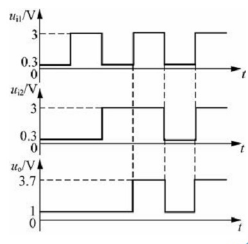


图 2.27　题(4)图

$$R=\frac{U_i-U_Z}{I_Z}=0.36\sim1.8\text{k}\Omega$$

（8）解：①当 $U_i=10$V 时，若 $U_o=U_Z=6$V，则稳压管的电流为 4mA，小于其最小稳定电流，所以稳压管未击穿。故 $U_o=\frac{R_L}{R+R_L}\cdot U_i\approx3.33$V。当 $U_i=15$V 时，稳压管中的电流大于最小稳定电流 I_{Zmin}，所以 $U_o=U_Z=6$V。同理，当 $U_i=35$V 时，$U_o=U_Z=6$V。

②$I_{DZ}=(U_i-U_Z)/R=29\text{mA}>I_{ZM}=25\text{mA}$，稳压管将因功耗过大而损坏。

（9）解：波形如图 2.28 所示。

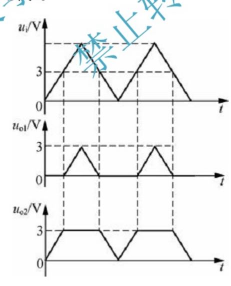


图 2.28　题(9)图

第3章

晶体三极管及放大电路



学习目的与要求

(1) 了解放大的概念。

(2) 掌握放大电路的组成原则和主要性能指标。

(3) 掌握放大电路的静态分析和动态分析方法。

(4) 掌握晶体管基本放大电路3种接法的主要特点和分析方法。



知识架构

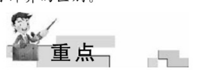
- 双极型三极管
  - BJT 的结构
  - BJT 的电流分配与放大原理
  - BJT 的特性曲线
  - BJT 的使用常识
- 共发射极基本放大电路
  - 共发射极放大电路各元件作用
  - 共发射极放大电路的静态分析
  - 用图解法分析动态工作情况
  - BJT 的3个工作区域及放大电路的非线性失真
  - 用小信号模型法分析动态工作情况
- 稳定静态工作点的放大电路
  - 温度对静态工作点的影响
  - 射极偏置电路
- 共集电极放大电路和共基极放大电路
  - 共集电极放大电路
  - 共基极放大电路
- 放大电路的频率特性
  - 频率特性的基本概念
  - 频率特性的定性分析及其指标
  - 对数频率特性曲线——波特图
  - BJT 的频率参数
  - 多级放大电路的频率特性
  - 共射-共基直接耦合放大电路及其频率特性





难点

计算放大电路动态指标，特别注意射极是否接有偏置电阻、是否接有旁路电容的动态指标计算的区别。



重点

(1) 判断三极管的工作状态：放大、截止、饱和。

(2) 确定三极管的动态范围：当工作点在放大区的中点时，三极管具有最大的动态范围，若不在中点，则以小的范围计算。

(3) 判断组态：根据信号的流向判断组态，基极进，集电极出，共射组态；射极进，集电极出，共基组态；基极进，射极出，共集组态。

注意：集电极不可以作输入端，分清组态对于复杂电路的分析非常重要。

(4) 三极管 3 种组态的静态分析和动态分析。静态分析采用图解法和估算法，动态分析采用图解法和微变等效电路法。

(5) 温度对三极管参数和静态工作点的影响及改进后的射极偏置电路的分析。

(6) 共集电极电路的特点：共集电极电路也称电压跟随器，其电压增益小于 1 而接近于 1；输出电压与输入电压同相；输入电阻高；输出电阻低；通常应用于输入极、输出极。



3.1 知识要点

3.1.1 BJT

1. BJT 结构简介

1) 种类

(1) 按照频率分，有高频管、低频管两种。

(2) 按照功率分，有小功率(<0.3W)、中功率(>0.3W)、大功率(>1W)管 3 种。

(3) 按照半导体材料分，有硅管、锗管等。

(4) 根据结构不同，分为 NPN 型和 PNP 型。

2) 结构特点

基区很薄且杂质浓度低；发射区掺杂浓度很高；集电区面积很大。

NPN 和 PNP 型 BJT 具有几乎等同的特性，但各电极端的电压极性和电流流向不同。

2. 放大状态下 BJT 工作原理

1）BJT 内部载流子传输过程(以 NPN 为例)

(1) 发射区向基区注入电子，由于发射结外加正向电压，发射区的多数载流子(电子)通过发射结扩散到基区，形成发射极电流 I_E。

(2) 电子在基区中的扩散与复合，发射区来的电子向集电结扩散，扩散过程中与基区空穴复合，形成了基极电流 I_B。电源 V_{BB} 从基区拉走电子，供给基区空穴，基区很薄(几微米)，基区掺杂浓度低，发射区电子大部分都能到达集电结。

(3) 集电区收集扩散过来的电子，集电结加反向电压，集电区电位最高，对基区扩散到集电结边缘的电子有很强吸引力，集电区收集电子，形成集电极电流 I_C。集电结加反向电压，基区中少数载流子(电子)和集电区中少数载流子(空穴)在结电场作用下形成反向漂移电流，称为反向饱和电流 I_{CBO}，数值很小，但受温度影响很大，容易使三极管工作不稳定。

2）电流分配关系

在满足放大条件的情况下，各极电流之间的关系为 $I_C=\beta I_B+I_{CBO}$，$I_E=I_C+I_B$，如果忽略 I_{CBO}，则有 $I_C\approx\beta I_B$，$I_E=(1+\beta)I_B$。

3. BJT 特性曲线

共射极电路的特性曲线，包括输入特性曲线和输出特性曲线。

(1) 输入特性曲线：$i_B=f(u_{BE})|_{u_{CE}}=$常数，如图 3.1 所示。

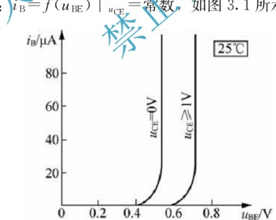


图 3.1 输入特性曲线

$u_{CE}=1V$ 时，集电结加反向电压，集电结吸引电子的能力加强，使从发射区进入基区的电子更多地流向集电区，因此对应于相同的 u_{BE}，流向基极的电流 i_B 比原来 $u_{CE}=0$ 时减小了，特性曲线相应地向右移动。

$u_{CE}>1V$ 以后的输入特性与 $u_{CE}=1V$ 的特性曲线非常接近。集电结所加的反向电压大到 1V 以后已能把大部分电子拉到集电区来，以至于 u_{CE} 再增加，i_B 也不再明显减小，通常只要画出 $u_{CE}>1V$ 以后的任何一条输入特性就可代表 $u_{CE}>1V$ 以后的各种情况了。

(2) 输出特性曲线：$i_C=f(u_{CE})|_{i_B}=$常数，如图 3.2 所示。



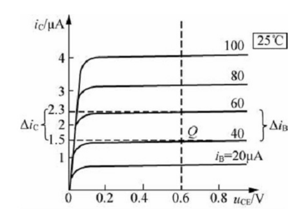


图 3.2　输出特性曲线

① 截止区。工作条件：$u_{BE}<U_{on}$，$u_{CE}>u_{BE}$。特点：$i_B=0$，$i_C\approx 0$，$u_{CE}\approx U_{CC}$。

② 放大区。工作条件：$u_{BE}>U_{on}$，$u_{CE}>u_{BE}$，$0<i_B<\dfrac{I_{CS}}{\beta}$。特点：$\Delta i_C=\beta\Delta i_B$，$I_{CS}$为集电极饱和电流，当$u_{CE}$超过某一数值(约 1V)后，输出特性是一组间隔基本均匀、比较平坦的平行直线。

③ 饱和区。工作条件：$i_B>\dfrac{I_{CS}}{\beta}$。特点：$u_{BE}>U_{on}$，$u_{CE}<u_{BE}$，$\Delta i_C\neq\beta\Delta i_B$，$u_{CE}=u_{CES}$，$i_C=I_{CS}=U_{CC}/R_C$。

4. BJT 主要参数

1）直流参数

共射直流电流放大系数为$\bar{\beta}=\dfrac{I_C-I_{CBO}}{I_B}\approx\dfrac{I_C}{I_B}$。

极间反向电流I_{CBO}和I_{CEO}，I_{CBO}是发射极开路时，集电结的反向饱和电流；I_{CEO}是基极开路时，集电极与发射极间的穿透电流。

2）交流参数

共射交流电流放大系数为$\beta=\dfrac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$。

3）极限参数

(1) 集电极最大允许电流I_{CM}：BJT 的参数变化不超过允许值时集电极允许的最大电流。

(2) 集电极最大允许功率损耗P_{CM}：超过此值就会使三极管性能变坏或烧毁，$P_{CM}=i_Cu_{CE}$。

(3) 反向击穿电压包含以下内容。

① $U_{(BR)EBO}$：集电极开路时发射极-基极间的反向击穿电压。

② $U_{(BR)CBO}$：发射极开路时集电极-基极间的反向击穿电压。

③ $U_{(BR)CEO}$：基极开路时集电极-发射极间的反向击穿电压。



3.1.2 基本共射极放大电路

1. 基本共射极放大电路的组成

(1) 组成原则：电阻取值、电源的极性和大小应保证 BJT 发射结正向偏置且集电结反向偏置，使 BJT 工作在放大区，当负载接入时，保证放大管输出回路的动态电流 i_C 作用于负载，以使负载获得放大的信号电流或信号电压。共射极放大电路如图 3.3 所示。

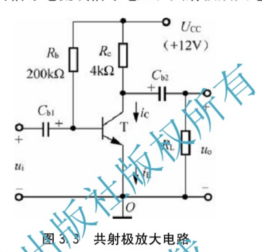


图 3.3 共射极放大电路

(2) 各元件作用：三极管起放大作用。直流电源 U_{CC} 通过基极电阻 R_b 为三极管发射结提供正向偏置电压，并为基极提供所需的偏置电流 I_B。耦合电容 C_{b1} 将 u_i 送入输入回路，电源电压 U_{CC}，通过 R_c 为三极管发射结提供反向偏置电压，C_{b2} 对交流信号而言，呈现的容抗很小，它将放大后的信号传送给负载 R_L。

2. 基本共射极放大电路的工作原理

1) 放大电路的工作状态

放大电路有两种工作状态，分别是静态和动态。

(1) 静态：$u_i=0$，电路中各处的电压、电流都是直流量。I_B、I_C 和 U_{CE} 的数值称为静态工作点(用 Q 表示)。

(2) 动态：当有正弦电压 u_i 输入时，电路处于动态。此时电路中交直流共存。

2) 直流通路和交流通路

(1) 直流通路：在直流电源作用下直流电流流经的部分电路，用于研究静态工作点。画直流通路时，将电容视为开路，电感线圈视为短路，信号源视为短路，但应保留其内阻，如图 3.4(a)所示。

(2) 交流通路：输入信号作用下交流信号流经的部分电路，用于研究动态参数及性能指标。画交流通路时，将容量大的电容视为短路，把直流电源视为短路，如图 3.4(b)所示。





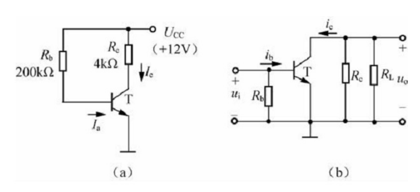


图 3.4 直流通路和交流通路

3. 用图解法分析非线性失真

(1) Q 点过高，输出波形产生底部失真。因晶体管饱和而产生的失真称为饱和失真。为了消除饱和失真，就要适当降低 Q 点。

(2) Q 点过低，输出波形产生顶部失真。BJT 截止而产生的失真称为截止失真。

(3) 最大不失真输出电压：U_{CEQ}为中心，取 $U_{CC}-U_{CEQ}$和 $U_{CEQ}-U_{CES}$中较小的数值；若除以$\sqrt{2}$，则得到其有效值。

为使不失真输出电压尽可能大，应将 Q 点设置在放大区内负载线的中点。

4. 小信号模型分析法

1) 晶体三极管等效模型

晶体三极管的 H 参数模型如图 3.5 所示。

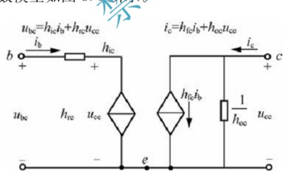


图 3.5 H 参数模型

图 3.6 所示 H 参数简化模型中

$$r_{be}=r_{bb'}+(1+\beta)U_T/I_{EQ}$$

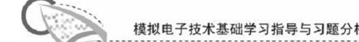
式中：$r_{bb'}$为基区体电阻，低频小功率管的 $r_{bb'}$约为 200Ω。上式的适用范围为 $0.1\text{mA}<I_{EQ}<5\text{mA}$。

2) 用 H 参数小信号模型分析共射极基本放大电路

利用 BJT 的 H 参数小信号模型分析放大电路的步骤如下所述。

(1) 根据直流通路估算静态工作点，并确定 H 参数。

(2) 画出放大电路的交流通路。



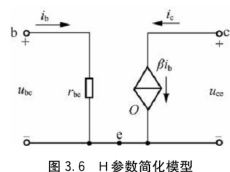


图 3.6　H 参数简化模型

（3）根据交流通路，用 BJT 的 H 参数小信号模型代替电路中的 BJT，并画出放大电路的小信号模型等效电路，如图 3.7 所示。

（4）根据放大电路的小信号模型等效电路计算放大电路的动态技术指标 A_u、R_i、R_o。小信号模型等效电路如图 3.7 所示。

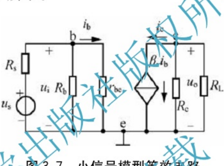


图 3.7　小信号模型等效电路

根据直流通路计算静态工作点：

$$I_{BQ}=\frac{U_{CC}-U_{BEQ}}{R_b}$$

$$I_{CQ}=\beta I_{BQ}\approx I_{EQ}$$

$$U_{CEQ}=U_{CC}-I_{CQ}R_C$$

$$r_{be}=r_{bb'}+(1+\beta)U_T/I_{EQ}$$

计算放大电路的性能指标：

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=-\frac{R_C \parallel R_L}{r_{be}}$$

计算输入电阻(图 3.8)：

$$R_i=\frac{u_i}{i_i}=R_b \parallel r_{be}\approx r_{be}$$

计算输出电阻(图 3.9)：

$$R_o=\frac{u_t}{i_t}\bigg|_{u_s=0,R_L=\infty}=R_C$$

图解法真实地反映了 BJT 的非线性特性，在输入低频大信号以及分析输出幅值波形失真的情况时比较合适。

小信号模型分析法将 BJT 的特性用线性网络来代替，并可利用电路计算的方法分析放大电路的各项技术指标，适用于高频小信号分析和计算。



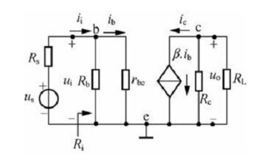


图 3.8　计算输入电阻

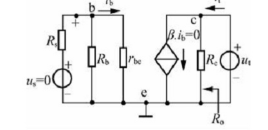


图 3.9　计算输出电阻

3.1.3　放大电路的工作点稳定问题

1. 温度对静态工作点的影响

由于温度变化，电源电压波动和元器件老化都会影响三极管的静态工作点，如果工作点不稳定，就会导致性能指标变化并使放大电路不工作在放大区。而温度的变化主要对三极管 I_{CEO}、β、U_{BE}产生影响，I_{CEO}、β、U_{BE}随温度 T 升高的结果，集中表现为对集电极电流 I_{CQ}的影响。

2. 射极偏置电路

射极偏置电路如图 3.10(a)所示。

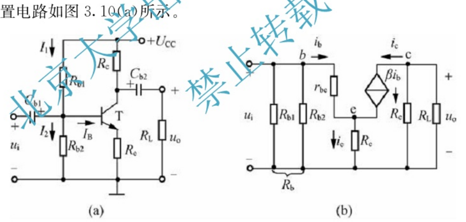


图 3.10　射极偏置电路

1）静态工作点

$$U_{BQ}=\frac{R_{b2}}{R_{b1}+R_{b2}}U_{CC}$$

$$I_{CQ}\approx I_{EQ}=\frac{U_{BQ}-U_{BEQ}}{R_e}\approx\frac{U_{BQ}}{R_e}$$

$$U_{CEQ}=U_{CC}-I_{CQ}R_c-I_{EQ}R_e\approx U_{CC}-I_{CQ}(R_c+R_e)$$

2）电压增益

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=\frac{-\beta i_b R_C\parallel R_L}{i_b r_{be}+(1+\beta)i_b R_e}=-\frac{R_C\parallel R_L}{r_{be}+(1+\beta)R_e}$$

R_e 起到稳定工作点的作用，但使电压增益下降，给 R_e 并联一个大电容 C_e(射极旁路



电容)来提高电路增益。

3）输入电阻

$$R_{\rm i}=\frac{u_{\rm i}}{i_{\rm i}}=R_{\rm b1}\parallel R_{\rm b2}\parallel[r_{\rm be}+(1+\beta)R_{\rm e}]$$

4）输出电阻

$$R_{\rm o}\approx R_{\rm c}$$

3.1.4 共集电极电路和共基极电路

1. 共集电极电路

集电极是输入、输出的端点。从发射极把信号输出去，又称为射极输出器。电压增益小于1而近于1，输出电压与输入电压同相，又称为射极跟随器。输入电阻高，可减小放大电路对信号源(或前级)索取的信号电流。输出电阻低，可减小负载变动对输出电压增益的影响。共集电极电路对电流仍有放大作用。共集电极电路如图3.11(a)所示。

1）静态分析

$$U_{\rm CC}=I_{\rm BQ}R_{\rm b}+U_{\rm BEQ}+(1+\beta)I_{\rm BQ}R_{\rm e}$$

$$I_{\rm CQ}=\beta I_{\rm BQ}$$

$$U_{\rm CEQ}=U_{\rm CC}+I_{\rm EQ}R_{\rm e}$$

2）动态分析

(1) 画出小信号模型等效电路，如图3.11(b)所示。

(2) 求电压增益

$$A_u=\frac{u_{\rm o}}{u_{\rm i}}=\frac{(1+\beta)i_{\rm b}(R_{\rm e}\parallel R_{\rm L})}{r_{\rm be}i_{\rm b}+(1+\beta)i_{\rm b}(R_{\rm e}\parallel R_{\rm L})}=\frac{(1+\beta)(R_{\rm e}\parallel R_{\rm L})}{r_{\rm be}+(1+\beta)(R_{\rm e}\parallel R_{\rm L})}$$

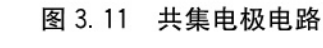
射极输出器的电压增益接近于1而略小于1。

(3) 输入电阻

$$R_{\rm i}=\frac{u_{\rm i}}{i_{\rm i}}=\frac{u_{\rm i}}{\dfrac{u_{\rm i}}{R_{\rm b}}+\dfrac{u_{\rm i}}{r_{\rm be}+(1+\beta)(R_{\rm e}\parallel R_{\rm L})}}=R_{\rm b}\parallel[r_{\rm be}+(1+\beta)(R_{\rm e}\parallel R_{\rm L})]$$

(a)　　(b)

图3.11　共集电极电路





(4) 输出电阻(图 3.12)：

$$R_o=\frac{u_t}{i_t}\bigg|_{u_s=0,R_L=\infty}$$

$$i_t=i_b+\beta i_b+i_{R_e}=(1+\beta)\frac{u_t}{R_s\parallel R_b+r_{be}}+\frac{u_t}{R_e}$$

$$R_o=R_e\parallel\frac{(R_s\parallel R_b)+r_{be}}{1+\beta}$$

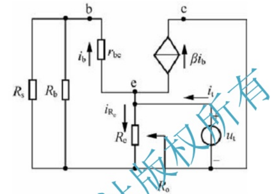


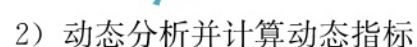
图 3.12 共集电极电路输出电阻

2. 共基极放大电路

共基极电路电流放大系数 α 接近于 1 且小于 1，共基极放大电路又称为电流跟随器，如图 3.13(a)所示。

1) 静态分析

直流通路与射极偏置电路相同。



2) 动态分析并计算动态指标

(1) 画出小信号模型等效电路，如图 3.13(b)所示。

(2) 电压增益

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=\frac{-\beta i_b(R_c\parallel R_L)}{-i_b r_{be}}=\frac{\beta(R_c\parallel R_L)}{r_{be}}$$

共基极电路与共发射极电路的电压增益数值相同，只差了一个负号。共基极电路的输出电压与输入电压同相。

(3) 输入电阻：

$$R_i=\frac{u_i}{i_i}=\frac{u_i}{\dfrac{u_i}{R_e}-(1+\beta)\dfrac{-u_i}{r_{be}}}=R_e\parallel\frac{r_{be}}{1+\beta}$$

共基电路的输入电阻低。

(4) 输出电阻：

$$R_o=R_c$$

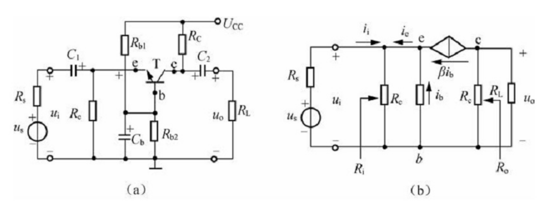


图 3.13　共基极电路

3. 三种组态的比较

通过对 BJT 这 3 种基本组态放大电路的比较，可充分了解各组态的特点，为今后正确选择电路组态奠定基础。3 种组态的比较见表 3－1。

表 3－1　三种组态的比较

电路组态	电压增益	电流放大	输入电阻	输出电阻	应用情况
共射放大电路	较大，u_i与 u_o反相	有电流放大	适中	较大	频带较窄，常作为低频放大单元电路
共集放大电路	$A_u \approx 1$，u_i与 u_o同相，具有电压跟随特性	有电流放大	最大	最小	常用于电压放大的输入级、输出级和中间级
共基放大电路	较大，u_i与 u_o同相	不能放大电流	小	较大	在 3 种组态中其频率特性最好，常用于宽带或高频放大电路

3.2　典型例题分析

例题 1：某放大电路中 BJT 的 3 个电极 A、B、C 的对地电位分别为 U_A＝－9V，U_B＝－6V，U_C＝6.2V，试分析 A、B、C 中哪个是基极 b，哪个是发射极 e，哪个是集电极 c，并说明此 BJT 是 NPN 管还是 PNP 管。

解：由于锗 BJT 的｜U_{BE}｜≈0.2V，硅 BJT 的｜U_{BE}｜≈0.7V，已知 BJT 的电极 B 的 U_B＝－6V，电极 C 的 U_C＝－6.2V，电极 A 的 U_A＝－9V，故电极 A 是集电极。又根据 BJT 工作在放大区时，必须保证发射结正偏、集电结反偏，可知电极 B 是发射极，电极 C 是基极，且此 BJT 为 PNP 管。

例题 2：试分析图 3.14 所示各电路对正弦交流信号有无放大作用，并简述理由(设各电容的容抗可忽略)。



解：图 3.14(a)所示电路无放大作用。因 $R_b=0\Omega$，一方面使发射结所加电压太高，易烧坏三极管；另一方面使输入信号 u_i 被短路。

图 3.14(b)所示电路有交流放大作用，电路偏置正常，且交流信号能够传输。

图 3.14(c)所示电路无交流放大作用，因电容 C_{b1} 隔断了基极的直流通路。

图 3.14(d)所示电路无交流放大作用，因电源 U_{CC} 的极性接反。

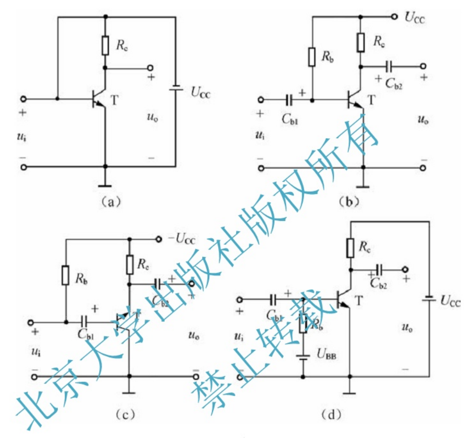


图 3.14 例题 2 图

例题 3：测量某硅 BJT 各电极对地的电压值如下，试判别三极管工作在什么区域。

(a) $U_C=6V$，$U_B=0.7V$，$U_E=0V$；(b) $U_C=6V$，$U_B=2V$，$U_E=1.3V$；

(c) $U_C=6V$，$U_B=6V$，$U_E=5.4V$；(d) $U_C=6V$，$U_B=4V$，$U_E=3.6V$；

(e) $U_C=3.6V$，$U_B=4V$，$U_E=3.4V$。

解：(a)放大区，因发射结正偏，集电结反偏；(b)放大区，$U_{BE}=(2-1.3)V=0.7V$，$U_{CE}=(6-2)V=4V$，发射结正偏，集电结反偏；(c)饱和区；(d)截止区；(e)饱和区。

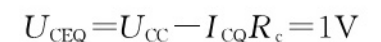
例题 4：设输出特性如图 3.15 所示的 BJT 接成图 3.16 所示的电路，其基极输入端上接 $U_{BB}=3.2V$ 与电阻 $R_b=20k\Omega$ 相串联，而 $U_{CC}=6V$，$R_C=200\Omega$，求电路中的 I_{BQ}、I_{CQ} 和 U_{CEQ} 的值，设 $U_{BEQ}=0.7V$。

解：
$$I_{BQ}=\frac{U_{BB}-U_{BEQ}}{R_b}=0.0125mA$$

由于 $\beta=200$，故

$$I_{CQ}=\beta I_{BQ}=200\times 0.125=25mA$$





$$U_{CEQ}=U_{CC}-I_{CQ}R_c=1V$$

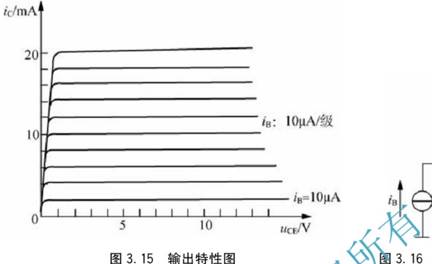


图 3.15　输出特性图　　图 3.16　例题 4 电路图

例题 5：电路如图 3.17(a)所示，电路的交、直流负载线绘于图 3.17(b)中，试求：①电源电压 U_{CC}，静态电流 I_{BQ}、I_{CQ}和管压降 U_{CEQ}的值；②电阻 R_b、R_C的值；③输出电压的最大不失真幅度；④要使电路能不失真地放大，基极正弦电流的最大幅值是多少？

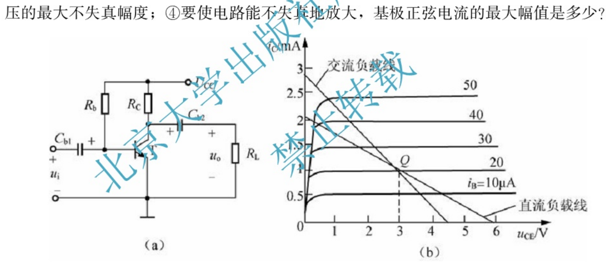


图 3.17　例题 5 图

解：(1) 由图 3.17(b)可知，直流负载线与横轴的交点即 U_{CC}值的大小，故 $U_{CC}=6V$。由 Q 点的位置可知，$I_{BQ}=20\mu A$，$I_{CQ}=1mA$，$U_{CEQ}=3V$。

(2) 由基极回路得

$$R_b\approx\frac{U_{CC}}{I_{BQ}}=300k\Omega$$

由集-射极回路得

$$R_c=\frac{U_{CC}-U_{CE}}{I_{CQ}}=3k\Omega$$

(3) 输出电压的最大不失真幅度：由交流负载线与输出特性的交点可知，在输入信号的正半周，输出电压 u_{CE}从 3V 到 0.8V，变化范围为 2.2V；在输入信号的负半周，输出电压 u_{CE}从 3V 到 4.6V，变化范围为 1.6V。综合考虑，输出电压的最大不失真幅度为 1.6V。

(4) 基极正弦电流的最大幅值是 $20\mu A$。

例题 6：画出图 3.18 所示电路的小信号等效电路，设电路中各电容容抗均可忽略，并注意标出电压、电流的正方向。

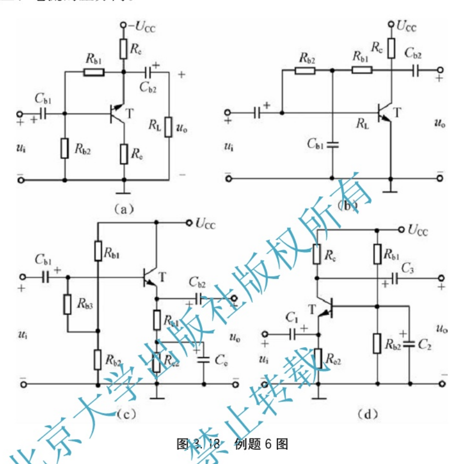


图 3.18　例题 6 图

解：图 3.18 所示各电路的小信号等效电路如图 3.19 所示。

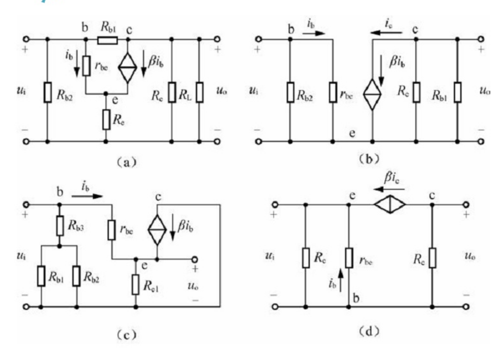


图 3.19　例题 6 图



例题7：单管放大电路如图3.20(a)所示，已知BJT的电流放大系数$\beta=50$。①估算Q点；②画出简化H参数小信号等效电路；③估算BJT的输入电阻r_{be}；④如输出端接入4kΩ的负载电阻，计算$A_u=\frac{u_o}{u_i}$及$A_{us}=\frac{u_o}{u_s}$。

解：(1) 估算Q点，画出直流通路，得

$$I_{BQ}\approx\frac{U_{CC}}{R_b}=40\mu A$$

$$I_{CQ}=\beta I_{BQ}=2mA$$

$$U_{CEQ}=U_{CC}-I_{CQ}R_c=4V$$

(2) 画出交流通路，并得简化的H参数小信号等效电路如图3.20(b)所示。

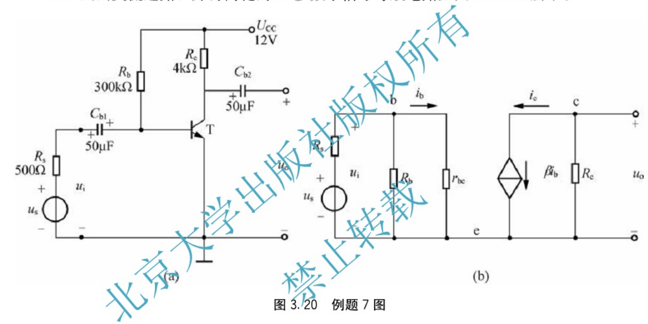


图3.20　例题7图

(3) 求r_{be}。

$$r_{be}=200\Omega+(1+\beta)\frac{26mV}{I_{EQ}}=200\Omega+(1+50)\frac{26mV}{2mA}=863\Omega$$

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=-\frac{\beta R_L'}{r_{be}}\approx-116$$

(4) $A_{us}=\frac{u_o}{u_s}=A_u\frac{R_i}{R_i+R_s}\approx-73$

例题8：在图3.21所示电路中，设电容C_1、C_2、C_3对交流信号而言可视为短路。①写出静态电流I_{CQ}及电压U_{CEQ}的表达式；②写出电压增益A_u、输入电阻R_i和输出电阻R_o的表达式；③若将电容C_3开路，对电路将会产生什么影响？

解：(1) 画出直流通路，I_{CQ}及U_{CEQ}的表达式

$$I_{CQ}=\beta I_{BQ}\approx\beta\frac{U_{CC}}{R_1}$$

$$U_{CEQ}=U_{CC}-I_{CQ}(R_2+R_3)$$

(2) 画出小信号等效电路，A_u、R_i和R_o的表达式为





$$A_u=-\frac{\beta\dfrac{R_2R_L}{R_2+R_L}}{r_{be}}$$

$$R_i=\frac{R_1r_{be}}{R_1+r_{be}}$$

$$R_o\approx R_2$$

（3）C_3开路后，将使电压增益的大小增加：

$$A_u=-\frac{\beta\dfrac{(R_2+R_3)R_L}{(R_2+R_3)+R_L}}{r_{be}}$$

同时 R_o 也将增加，$R_o\approx R_2+R_3$。

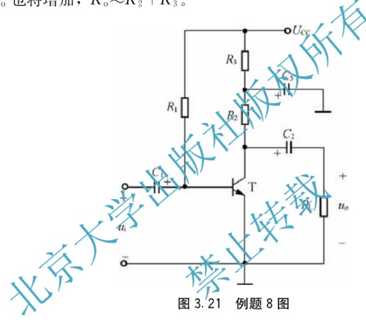


图 3.21　例题 8 图

例题 9：如图 3.22 所示的偏置电路中，热敏电阻 R_t具有负温度系数，问其能否起到稳定工作点的作用？

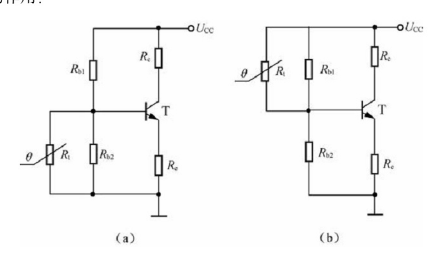


图 3.22　偏置电路(例题 9 图)

解：图 3.22(a)所示电路能稳定 Q 点，过程如下：

$$T\uparrow\begin{cases}\rightarrow I_{CQ}\uparrow\\ \rightarrow R_t\downarrow\rightarrow U_{BEQ}\downarrow\rightarrow I_{BQ}\downarrow\rightarrow I_{CQ}\downarrow\end{cases}$$

图 3.22(b)所示电路不能稳定 Q 点，因为

$$T\uparrow\begin{cases}\rightarrow I_{CQ}\uparrow\\ \rightarrow R_t\downarrow\rightarrow U_{BEQ}\uparrow\rightarrow I_{BQ}\uparrow\rightarrow I_{CQ}\uparrow\end{cases}$$

例题 10：电路如图 3.23 所示，设 $\beta=100$，试求：

(1) Q 点；

(2) 电压增益 $A_{us1}=\dfrac{u_{o1}}{u_s}$和 $A_{us2}=\dfrac{u_{o2}}{u_s}$；

(3) 输入电阻 R_i；

(4) 输出电阻 R_{o1} 和 R_{o2}。

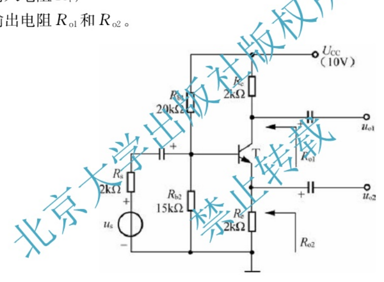


图 3.23　例题 10 图

解：(1) 根据直流通路，求 Q 点。

$$U_{BQ}=\frac{R_{b2}}{R_{b1}+R_{b2}}U_{CC}\approx4.3\text{V}$$

$$I_{CQ}\approx I_{EQ}=\frac{U_{BQ}-U_{BEQ}}{R_e}=1.8\text{mA}$$

$$U_{CEQ}=U_{CC}-I_{CQ}(R_c+R_e)=2.8\text{V}$$

$$I_{BQ}=\frac{I_{CQ}}{\beta}=18\mu\text{A}$$

(2) 根据交流通路，求 r_{be}及 R_i。

$$r_{be}=r_{bb'}+(1+\beta)\frac{26\text{mV}}{I_{EQ}}\approx1.66\text{k}\Omega$$

$$R_i=R_{b1}\parallel R_{b2}\parallel\ [r_{be}+(1+\beta)R_e]\approx8.2\text{k}\Omega$$

(3) 根据交流通路，求 A_{us1} 和 A_{us2}。



$$A_{us1}=\frac{u_{o1}}{u_s}=\frac{u_{o1}}{u_i}\cdot\frac{u_i}{u_s}=-\frac{\beta R_c}{r_{be}+(1+\beta)R_e}\cdot\frac{R_i}{R_s+R_i}\approx-0.79$$

$$A_{us2}=\frac{u_{o2}}{u_s}=\frac{u_{o2}}{u_i}\cdot\frac{u_i}{u_s}=\frac{(1+\beta)R_e}{r_{be}+(1+\beta)R_e}\cdot\frac{R_i}{R_s+R_i}\approx0.8$$

（4）根据交流通路，求 R_{o1} 和 R_{o2}。

$$R_{o1}\approx R_c=2\text{k}\Omega,\ R_{o2}=R_e\parallel\frac{r_{be}+(R_{b1}\parallel R_{b2}\parallel R_s)}{1+\beta}\approx31\Omega$$

例题 11：共基极电路如图 3.24 所示。射极电路里接入一恒流源，$\beta=100$，$R_s=0$，$R_L=\infty$。试确定电路的电压增益、输入电阻和输出电阻。

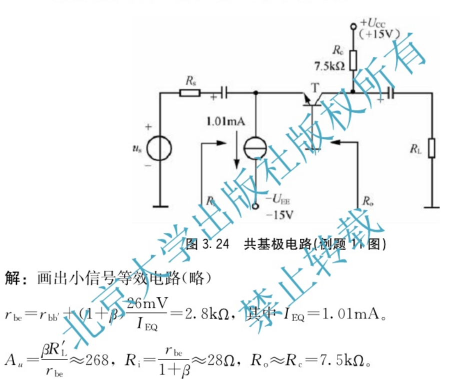


图 3.24　共基极电路(例题 11 图)

解：画出小信号等效电路(略)

$r_{be}=r_{bb'}+(1+\beta)\dfrac{26\text{mV}}{I_{EQ}}=2.8\text{k}\Omega$，其中 $I_{EQ}=1.01\text{mA}$。

$A_u=\dfrac{\beta R_L'}{r_{be}}\approx268$，$R_i=\dfrac{r_{be}}{1+\beta}\approx28\Omega$，$R_o\approx R_c=7.5\text{k}\Omega$。

3.3　自　测　题

自测题一：判断下列说法是否正确。

（1）只有电路既能放大电流又能放大电压，才称其有放大作用。（　　）

（2）可以说任何放大电路都有功率放大作用。（　　）

（3）放大电路中输出的电流和电压都是由有源元件提供的。（　　）

（4）电路中各电量的交流成分是交流信号源提供的。（　　）

（5）放大电路必须加上合适的直流电源才能正常工作。（　　）

（6）由于放大的对象是变化量，所以当输入信号为直流信号时，任何放大电路的输出都毫无变化。（　　）

（7）只要是共射放大电路，其输出电压的底部失真都是饱和失真。（　　）

解：(1) × (2)√ (3)× (4)× (5)√ (6)× (7)×

自测题二：选择题与填空题。

(1) 在图 3.25 所示电路中，已知 $U_{CC}=12V$，晶体管的 $\beta=100$，$R_b'=100k\Omega$。填空：要求先填文字表达式后填得数。

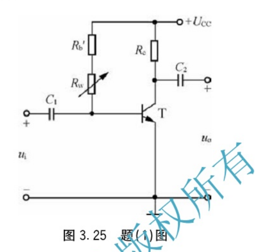


图 3.25 题(1)图

① 当 $u_i=0V$ 时，测得 $U_{BEQ}=0.7V$，若要基极电流 $I_{BQ}=20\mu A$，则 R_b' 和 R_w 之和 $R_b'=$ ________ ≈ ________ kΩ；而若测得 $U_{CEQ}=6V$，则 $R_c=$ ________ ≈ ________ kΩ。

② 若测得输入电压有效值 $U_i=5mV$ 时，输出电压有效值 $U_o'=0.6V$，则电压放大倍数 $A_u=$ ________ ≈ ________。若负载电阻 R_L 值与 R_c 相等，则带上负载后输出电压有效值 U_o = ________ = ________ V。

解：①$(U_{CC}-U_{BEQ})/I_{BQ}$，565；$(U_{CC}-U_{CEQ})/\beta I_{BQ}$，3。

② $-U_o/U_i$，-120；$\dfrac{R_L}{R_c+R_L}\cdot U_o'$，0.3。

(2) 已知图 3.25 所示电路中，$U_{CC}=12V$，$R_c=3k\Omega$，静态管压降 $U_{CEQ}=6V$，并在输出端加负载电阻 R_L，其阻值为 3kΩ。选择一个合适的答案填入空内。

① 该电路的最大不失真输出电压有效值 $U_{om}\approx$ ________。

A. 2V　　B. 3V　　C. 6V

② 当 $U_i=1mV$ 时，若在不失真的条件下，减小 R_w，则输出电压的幅值将 ________。

A. 减小　　B. 不变　　C. 增大

③ 在 $U_i=1mV$ 时，将 R_w 调到输出电压最大且刚好不失真，若此时增大输入电压，则输出电压波形将 ________。

A. 顶部失真　　B. 底部失真　　C. 为正弦波

④ 若发现电路出现饱和失真，则为消除失真，可将 ________。

A. R_w 减小　　B. R_c 减小　　C. U_{CC} 减小

解：①A　②C　③B　④B

(3) 现有直接耦合基本放大电路如下。



A. 共射电路　　　　B. 共集电路　　　　C. 共基电路
D. 共源电路　　　　E. 共漏电路

① 输入电阻最小的电路是 ________，最大的是 ________。
② 输出电阻最小的电路是 ________。
③ 有电压放大作用的电路是 ________。
④ 有电流放大作用的电路是________。
⑤ 高频特性最好的电路是 ________。
⑥ 输入电压与输出电压同相的电路是 ________；反相的电路是 ________。

解：①C，DE　②B　③ACD　④ABDE　⑤C　⑥BCE，AD

自测题三：分析计算题。

(1) 试分析图 3.26 所示各电路是否能够放大正弦交流信号，简述理由。设图中所有电容对交流信号均可视为短路。

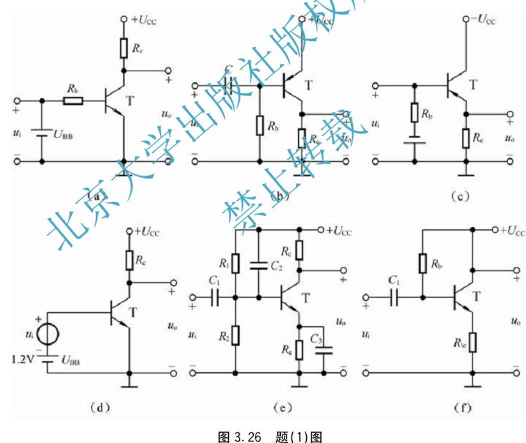


图 3.26　题(1)图

解：(a)不能。因为输入信号被 U_{BB} 短路。(b)可能。(c)不能。因为输入信号作用于基极与地之间，不能驮载在静态电压之上，否则必然失真。(d)不能。晶体管将因发射结电压过大而损坏。(e)不能。因为输入信号被 C_2 短路。(f)不能。因为输出信号被 U_{CC} 短路，恒为零。

3.4 练 习 题

（1）按要求填写下表。

电路名称	连接方式(e、c、b)			性能比较(大、中、小)				
	公共端	输入端	输出端	$\lvert\dot{A}_u\rvert$	$\dot{A}_i$	R_i	R_o	其他
共射电路								
共集电路								
共基电路								

（2）分别改正图 3.27 所示各电路中的错误，使它们有可能放大正弦波信号。要求保留电路原来的共射接法和耦合方式。

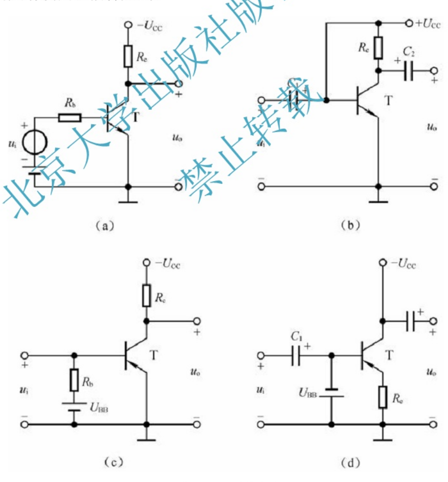


图 3.27 题(2)图

（3）画出图 3.28 所示各电路的直流通路和交流通路。设所有电容对交流信号短路。





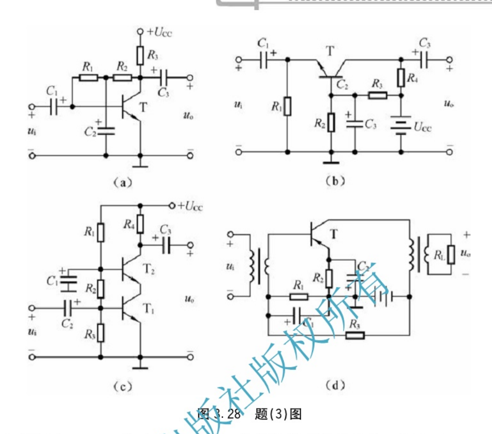


图 3.28　题(3)图

(4) 电路如图 3.29(a)所示，图 3.29(b)是晶体管的输出特性，静态时 $U_{BEQ}=0.7V$。利用图解法分别求出 $R_L=\infty$ 和 $R_L=3k\Omega$ 时的静态工作点和最大不失真输出电压 U_{om}(有效值)。

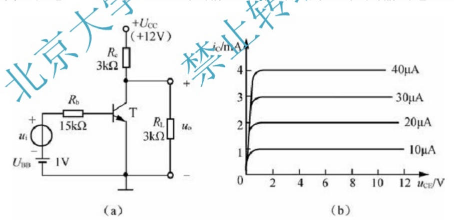


图 3.29　题(4)图

(5) 在图 3.30 所示电路中，已知晶体管的 $\beta=80$，$r_{be}=1k\Omega$，$U_i=20mV$；静态时 $U_{BEQ}=0.7V$，$U_{CEQ}=4V$，$I_{BQ}=20\mu A$。判断下列结论是否正确，对的在括号内打“√”，错的打“×”。

① $A_u=-\dfrac{4}{20\times10^{-3}}=-200$　(　　)　　② $A_u=-\dfrac{4}{0.7}\approx-5.71$　(　　)

③ $A_u=-\dfrac{80\times5}{1}=-400$　(　　)　　④ $A_u=-\dfrac{80\times2.5}{1}=-200$　(　　)

⑤ $R_i=\left(\dfrac{20}{20}\right)k\Omega=1k\Omega$　(　　)　　⑥ $R_i=\left(\dfrac{0.7}{0.02}\right)k\Omega=35k\Omega$　(　　)

⑦ $R_i \approx 3k\Omega$ （ ）　⑧ $R_i \approx 1k\Omega$ （ ）

⑨ $R_o \approx 5k\Omega$ （ ）　⑩ $R_o \approx 2.5k\Omega$ （ ）

⑪ $U_s \approx 20mV$ （ ）　⑫ $U_s \approx 60mV$ （ ）

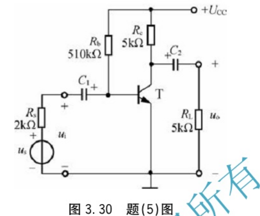


图 3.30　题(5)图

（6）电路如图 3.31 所示，已知晶体管 $\beta=50$，在下列情况下，用直流电压表测晶体管的集电极电位，应分别为多少？设 $U_{CC}=12V$，晶体管饱和管压降 $U_{CES}=0.5V$。

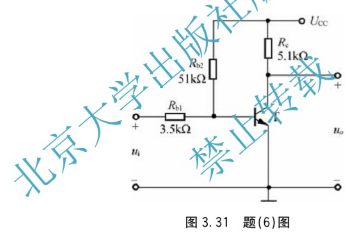


图 3.31　题(6)图

①正常情况；②R_{b1}短路；③R_{b1}开路；④R_{b2}开路；⑤R_c短路。

（7）电路如图 3.32 所示，晶体管的 $\beta=80$，$r_{bb'}=100\Omega$。分别计算 $R_L=\infty$ 和 $R_L=3k\Omega$ 时的 Q 点、A_u、R_i 和 R_o。

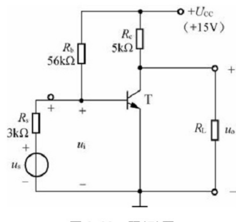


图 3.32　题(7)图



(8) 在图 3.32 所示电路中，由于电路参数不同，故在信号源电压为正弦波时，测得的输出波形分别如图 3.33(a)、(b)、(c)所示，说明电路分别产生了什么失真，如何消除。

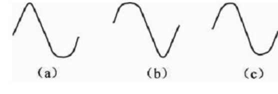


图 3.33 题(8)图

(9) 若由 PNP 型管组成的共射电路中，输出电压波形如图 3.33(a)、(b)、(c)所示，则分别产生了什么失真？

(10) 已知图 3.34 所示电路中，晶体管的 $\beta=100$，$r_{be}=1\text{k}\Omega$。①现已测得静态管压降 $U_{CEQ}=6\text{V}$，估算 R_b 约为多少千欧；②若测得 U_i 和 U_o 的有效值分别为 1mV 和 100mV，则负载电阻 R_L 为多少千欧？

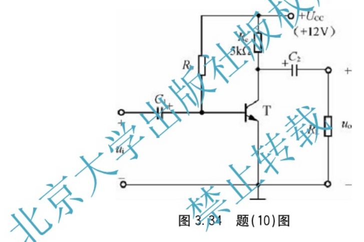


图 3.34 题(10)图

(11) 在图 3.34 所示电路中，设静态时 $I_{CQ}=2\text{mA}$，晶体管饱和管压降 $U_{CES}=0.6\text{V}$。试问：当负载电阻 $R_L=\infty$ 和 $R_L=3\text{k}\Omega$ 时，电路的最大不失真输出电压各为多少伏？

(12) 在图 3.34 所示电路中，设某一参数变化时其余参数不变，在表中填入①增大②减小或③基本不变。

参数变化	I_{BQ}	U_{CEQ}	$\lvert\dot{A}_u\rvert$	R_i	R_o
R_b增大					
R_c增大					
R_L增大					

(13) 电路如图 3.35 所示，晶体管的 $\beta=100$，$r_{bb'}=100\Omega$。试求：①电路的 Q 点、$\dot{A}_u$、R_i和 R_o；②若电容 C_e开路，则将引起电路的哪些动态参数发生变化？如何变化？

(14) 试求出图 3.27(a)所示电路 Q 点、$\dot{A}_u$、R_i和 R_o的表达式。

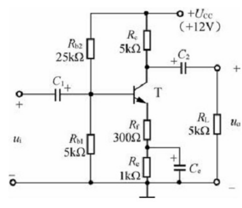


图 3.35　题(13)图

(15) 试求出图 3.27(b)所示电路 Q 点、$\dot{A}_u$、R_i和 R_o的表达式。设静态时，R_2中的电流远大于 T 的基极电流。

(16) 试求出图 3.27(c)所示电路 Q 点、$\dot{A}_u$、R_i和 R_o的表达式。设静态时，R_2中的电流远大于 T_2的基极电流且 R_3中的电流远大于 T_1的基极电流。

(17) 设图 3.36 所示电路输入电压为正弦波。试问：①$\dot{A}_{u1}=\dot{U}_{o1}/\dot{U}_i\approx$?，$\dot{A}_{u2}=\dot{U}_{o2}/\dot{U}_i\approx$? ②画出输入电压和输出电压 u_i、u_{o1}、u_{o2}的波形。

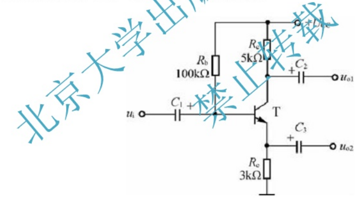


图 3.36　题(17)图

(18) 电路如图 3.37 所示，晶体管的 $\beta=80$，$r_{be}=1\text{k}\Omega$。①求出 Q 点；②分别求出 $R_L=\infty$和 $R_L=3\text{k}\Omega$ 时电路的 $\dot{A}_u$ 和 R_i；③求出 R_o。

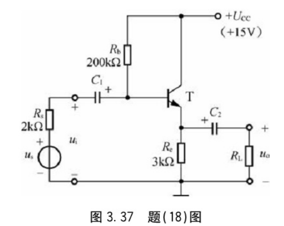


图 3.37　题(18)图



(19) 电路如图 3.38 所示，晶体管的 $\beta=60$，$r_{bb'}=100\Omega$。①求 Q 点、$\dot{A}_u$、R_i和 R_o；②设 $U_s=10$mV(有效值)，问①$U_i=?$，$U_o=?$；②若 C_3开路，则 $U_i=?$，$U_o=?$。

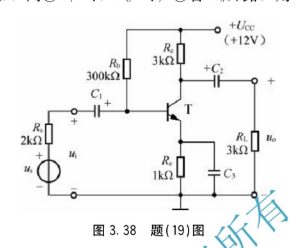


图 3.38　题(19)图

(20) 图 3.39 中的哪些接法可以构成复合管？标出它们等效管的类型(如 NPN 型、PNP 型、N 沟道结型、……)及管脚(b、e、c、d、g、s)。

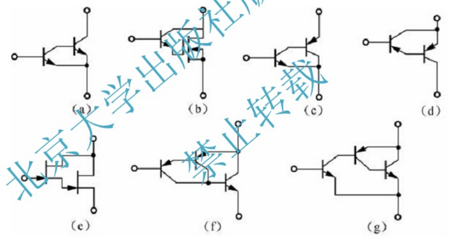


图 3.39　题(20)图

练习题答案

(1) 解：答案如表所示。

电路名称	连接方式(e、c、b)			性能比较(大、中、小)				
	公共端	输入端	输出端	$\|\dot{A}_u\|$	$\dot{A}_i$	R_i	R_o	其他
共射电路	e	b	c	大	大	小	大	
共集电路	c	b	e	小	大	大	小	
共基电路	b	e	c	大	小	小	大	频带宽

(2) 解：图 3.26(a)将 $-U_{CC}$ 改为 $+U_{CC}$。图 3.26(b)在 $+U_{CC}$ 与基极之间加 R_b。图 3.26(c)将 U_{BB} 反接，且在输入端串联一个电阻。图 3.26(d)在 U_{BB} 支路加 R_b，在 $-U_{CC}$ 与集电极之间加 R_c。

(3) 解：将电容开路、变压器线圈短路后即为直流通路，图略。图 3.28 所示各电路的交流通路如图 3.40 所示。

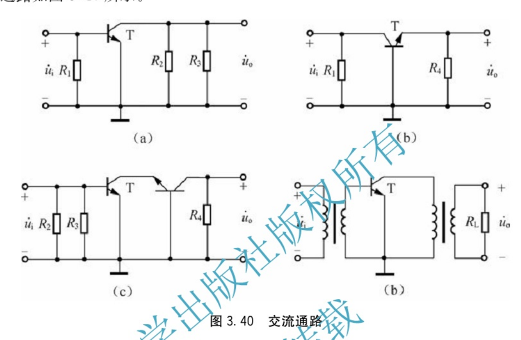


图 3.40　交流通路

(4) 解：空载时：$I_{BQ}=20\mu A$，$I_{CQ}=2mA$，$U_{CEQ}=6V$；最大不失真输出电压峰值约为 5.3V，有效值约为 3.75V。

带载时：$I_{BQ}=20\mu A$，$I_{CQ}=2mA$，$U_{CEQ}=3V$；最大不失真输出电压峰值约为 2.3V，有效值约为 1.63V。如图 3.41 所示。

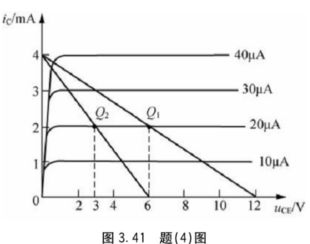


图 3.41　题(4)图

(5) 解：①×　②×　③×　④√　⑤×　⑥×　⑦×　⑧√　⑨√　⑩×　⑪×　⑫√

(6) 解：设 $U_{BE}=0.7V$。则



① 基极静态电流为

$$I_{\mathrm{B}}=\frac{U_{\mathrm{CC}}-U_{\mathrm{BE}}}{R_{\mathrm{b2}}}-\frac{U_{\mathrm{BE}}}{R_{\mathrm{b1}}}\approx 0.022\mathrm{mA}$$

$$U_{\mathrm{C}}=U_{\mathrm{CC}}-I_{\mathrm{C}}R_{\mathrm{c}}\approx 6.4\mathrm{V}$$

② 由于 $U_{\mathrm{BE}}=0\mathrm{V}$，T 截止，$U_{\mathrm{C}}=12\mathrm{V}$。

③ 临界饱和基极电流为

$$I_{\mathrm{BS}}=\frac{U_{\mathrm{CC}}-U_{\mathrm{CES}}}{\beta R_{\mathrm{c}}}\approx 0.045\mathrm{mA}$$

实际基极电流为

$$I_{\mathrm{B}}=\frac{U_{\mathrm{CC}}-U_{\mathrm{BE}}}{R_{\mathrm{b2}}}\approx 0.22\mathrm{mA}$$

由于 $I_{\mathrm{B}}>I_{\mathrm{BS}}$，故 T 饱和，$U_{\mathrm{C}}=U_{\mathrm{CES}}=0.5\mathrm{V}$。

④ T 截止，$U_{\mathrm{C}}=12\mathrm{V}$。

⑤ 由于集电极直接接直流电源，故 $U_{\mathrm{C}}=U_{\mathrm{CC}}=12\mathrm{V}$。

(7) 解：在空载和带负载情况下，电路的静态电流、r_{be}均相等，它们分别为

$$I_{\mathrm{BQ}}=\frac{U_{\mathrm{CC}}-U_{\mathrm{BEQ}}}{R_{\mathrm{b}}}-\frac{U_{\mathrm{BEQ}}}{R}\approx 22\mu\mathrm{A},\ I_{\mathrm{CQ}}=\beta I_{\mathrm{BQ}}\approx 1.76\mathrm{mA},\ r_{\mathrm{be}}=r_{\mathrm{bb'}}+(1+\beta)\frac{26\mathrm{mV}}{I_{\mathrm{EQ}}}\approx 1.3\mathrm{k\Omega}$$

空载时，静态管压降、电压放大倍数、输入电阻和输出电阻分别为

$$U_{\mathrm{CEQ}}=U_{\mathrm{CC}}-I_{\mathrm{CQ}}R_{\mathrm{c}}\approx 6.2\mathrm{V},\ \dot{A}_u=-\frac{\beta R_{\mathrm{c}}}{r_{\mathrm{be}}}\approx -308;$$

$$R_{\mathrm{i}}=R_{\mathrm{b}}/\!/r_{\mathrm{be}}\approx r_{\mathrm{be}}\approx 1.3\mathrm{k\Omega},\ \dot{A}_{us}\approx\frac{r_{\mathrm{be}}}{R_{\mathrm{s}}+r_{\mathrm{be}}}\cdot\dot{A}_u\approx -93,\ R_{\mathrm{o}}=R_{\mathrm{c}}=5\mathrm{k\Omega}。$$

$R_{\mathrm{L}}=5\mathrm{k\Omega}$ 时，静态管压降、电压放大倍数分别为

$$U_{\mathrm{CEQ}}=\frac{R_{\mathrm{L}}}{R_{\mathrm{c}}+R_{\mathrm{L}}}-I_{\mathrm{CQ}}(R_{\mathrm{c}}/\!/R_{\mathrm{L}})\approx 2.3\mathrm{V},\ \dot{A}_u=-\frac{\beta R'_{\mathrm{L}}}{r_{\mathrm{be}}}\approx -115,\ \dot{A}_{us}\approx\frac{r_{\mathrm{be}}}{R_{\mathrm{s}}+r_{\mathrm{be}}}\cdot\dot{A}_u\approx -47;$$

$$R_{\mathrm{i}}=R_{\mathrm{b}}/\!/r_{\mathrm{be}}\approx r_{\mathrm{be}}\approx 1.3\mathrm{k\Omega},\ R_{\mathrm{o}}=R_{\mathrm{c}}=5\mathrm{k\Omega}。$$

(8) 解：图 3.33(a)饱和失真，增大 R_{b}，减小 R_{c}。图 3.33(b)截止失真，减小 R_{b}。图 3.33(c)同时出现饱和失真和截止失真，应增大 U_{CC}。

(9) 解：图 3.33(a)截止失真；图 3.33(b)饱和失真；图 3.33(c)同时出现饱和失真和截止失真。

(10) 解：①求解 R_{b}。

$$I_{\mathrm{CQ}}=\frac{U_{\mathrm{CC}}-U_{\mathrm{CEQ}}}{R_{\mathrm{c}}}=2\mathrm{mA},\ I_{\mathrm{BQ}}=\frac{I_{\mathrm{CQ}}}{\beta}=20\mu\mathrm{A},\ R_{\mathrm{b}}=\frac{U_{\mathrm{CC}}-U_{\mathrm{BEQ}}}{I_{\mathrm{BQ}}}\approx 565\mathrm{k\Omega}。$$

② 求解 R_{L}。

$$\dot{A}_u=-\frac{U_{\mathrm{o}}}{U_{\mathrm{i}}}=-100,\ \dot{A}_u=-\frac{\beta R'_{\mathrm{L}}}{r_{\mathrm{be}}},\ R'_{\mathrm{L}}=1\mathrm{k\Omega},\ \frac{1}{R_{\mathrm{c}}}+\frac{1}{R_{\mathrm{L}}}=1,\ R_{\mathrm{L}}=1.5\mathrm{k\Omega}。$$

(11) 解：由于 $I_{\mathrm{CQ}}=2\mathrm{mA}$，所以 $U_{\mathrm{CEQ}}=U_{\mathrm{CC}}-I_{\mathrm{CQ}}R_{\mathrm{c}}=6\mathrm{V}$。

空载时，若输入信号增大到一定幅值，电路首先出现饱和失真。故

$$U_{om}=\frac{U_{CEQ}-U_{CES}}{\sqrt{2}}\approx 3.82\text{V}$$

$R_L=3\text{k}\Omega$ 时，若输入信号增大到一定幅值，电路首先出现截止失真。故

$$U_{om}=\frac{I_{CQ}R_L'}{\sqrt{2}}\approx 2.12\text{V}$$

(12) 解：答案如下表所示。

参数变化	I_{BQ}	U_{CEQ}	$\lvert\dot{A}_u\rvert$	R_i	R_o
R_b增大	②	①	②	①	③
R_c增大	③	②	①	③	①
R_L增大	③	③	①	③	③

(13) 解：① 静态分析

$U_{BQ}\approx\frac{R_{b1}}{R_{b1}+R_{b2}}\cdot U_{CC}=2\text{V}$，$I_{EQ}=\frac{U_{BQ}-U_{BEQ}}{R_f+R_e}\approx 1\text{mA}$；

$I_{BQ}=\frac{I_{EQ}}{1+\beta}\approx 10\mu\text{A}$，$U_{CEQ}\approx U_{CC}-I_{EQ}(R_c+R_f+R_e)=5.7\text{V}$。

动态分析：

$r_{be}=r_{bb'}+(1+\beta)\frac{26\text{mV}}{I_{EQ}}\approx 2.73\text{k}\Omega$，$\dot{A}_u=-\frac{\beta(R_c/\!/R_L)}{r_{be}+(1+\beta)R_f}\approx -7.7$；

$R_i=R_{b1}/\!/R_{b2}/\!/[r_{be}+(1+\beta)R_f]\approx 3.7\text{k}\Omega$，$R_o=R_c=5\text{k}\Omega$。

② R_i增大，$R_i\approx 4.1\text{k}\Omega$；$\lvert\dot{A}_u\rvert$减小，$\dot{A}_u\approx-\frac{R_L'}{R_f+R_e}\approx -1.92$。

(14) 解：Q 点为

$I_{BQ}=\frac{U_{CC}-U_{BEQ}}{R_1+R_2+(1+\beta)R_c}$，$I_{CQ}=\beta I_{BQ}$，$U_{CEQ}=U_{CC}-(1+\beta)I_{BQ}R_c$。

$\dot{A}_u$、R_i和 R_o的表达式分别为

$\dot{A}_u=-\beta\frac{R_2/\!/R_3}{r_{be}}$，$R_i=r_{be}/\!/R_1$，$R_o=R_2/\!/R_3$。

(15) 解：Q 点

$I_{BQ}=\left(\frac{R_2}{R_2+R_3}U_{CC}-U_{BEQ}\right)/[(1+\beta)R_1]$，

$I_{CQ}=\beta I_{BQ}$，$U_{CEQ}=U_{CC}-I_{CQ}(R_c+R_e)$。

$\dot{A}_u$、R_i和 R_o的表达式分别为

$\dot{A}_u=\frac{\beta R_4}{r_{be}}$，$R_i=R_1/\!/\frac{r_{be}}{1+\beta}$，$R_o=R_4$。

(16) 解：两只晶体管的静态电流、管压降分析如下：



$I_{BQ1} \approx \dfrac{U_{CC}-U_{BEQ1}}{R_1+R_2}-\dfrac{U_{BEQ1}}{R_3}$，$I_{CQ2} \approx I_{CQ1}=\beta I_{BQ1}$，$U_{CQ2}=U_{CC}-I_{CQ2}R_4$；

$U_{BQ2} \approx \dfrac{R_2}{R_1+R_2}(U_{CC}-U_{BEQ1})+U_{BEQ1}$，$U_{CEQ1}=U_{BQ2}-U_{BEQ2}$，$U_{CEQ2}=U_{CQ2}-U_{BQ2}+U_{BEQ2}$。

$\dot{A}_u$、R_i和R_o的表达式分析如下：

$\dot{A}_{u1}=-\dfrac{\beta_1 \cdot \dfrac{r_{be2}}{1+\beta_2}}{r_{be1}}$，$\dot{A}_{u2}=\dfrac{\beta_2 R_4}{r_{be2}}$，$\dot{A}_u=\dot{A}_{u1}\dot{A}_{u2}$，$R_i=R_2 /\!/ R_3 /\!/ r_{be1}$，$R_o=R_4$。

(17) 解：①因为通常 $\beta \gg 1$，所以电压放大倍数分别应为

$\dot{A}_{u1}=-\dfrac{\beta R_c}{r_{be}+(1+\beta)R_e} \approx -\dfrac{R_c}{R_e}=-1$，$\dot{A}_{u2}=\dfrac{(1+\beta)R_e}{r_{be}+(1+\beta)R_e} \approx +1$。

② 两个电压放大倍数说明 $u_{o1} \approx -u_i$，$u_{o2} \approx u_i$。波形如图 3.42 所示。

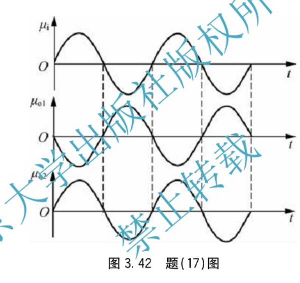


图 3.42 题(17)图

(18) 解：① Q 点为

$I_{BQ}=\dfrac{U_{CC}-U_{BEQ}}{R_b+(1+\beta)R_e} \approx 32.3\mu A$，$I_{EQ}=(1+\beta)I_{BQ} \approx 2.61mA$，$U_{CEQ}=U_{CC}-I_{EQ}R_e \approx 7.17V$。

② 输入电阻和电压放大倍数为

$R_L=\infty$时

$R_i=R_b /\!/ [r_{be}+(1+\beta)R_e] \approx 110k\Omega$，$\dot{A}_u=\dfrac{(1+\beta)R_e}{r_{be}+(1+\beta)R_e} \approx 0.996$。

$R_L=3k\Omega$ 时

$R_i=R_b /\!/ [r_{be}+(1+\beta)(R_e /\!/ R_L)] \approx 76k\Omega$，$\dot{A}_u=\dfrac{(1+\beta)(R_e /\!/ R_L)}{r_{be}+(1+\beta)(R_e /\!/ R_L)} \approx 0.992$。

③ 输出电阻为

$$R_o=R_e /\!/ \frac{R_s /\!/ R_b+r_{be}}{1+\beta} \approx 37\Omega$$

(19) 解：①Q 点为

$I_{BQ}=\dfrac{U_{CC}-U_{BEQ}}{R_b+(1+\beta)R_e}\approx31\mu A$，$I_{CQ}=\beta I_{BQ}\approx1.86mA$，$U_{CEQ}\approx U_{CC}-I_{EQ}(R_c+R_e)=4.56V$。

$\dot{A}_u$、R_i和R_o的分析如下：

$r_{be}=r_{bb'}+(1+\beta)\dfrac{26mV}{I_{EQ}}\approx952\Omega$，$R_i=R_b/\!/r_{be}\approx952\Omega$；

$\dot{A}_u=-\dfrac{\beta(R_c/\!/R_L)}{r_{be}}\approx-95$，$R_o=R_c=3k\Omega$。

② 设$U_s=10mV$(有效值)，则

$U_i=\dfrac{R_i}{R_s+R_i}\cdot U_s\approx3.2mV$，$U_o=|\dot{A}_u|U_i\approx304mV$。

若C_3开路，则

$R_i=R_b/\!/[r_{be}+(1+\beta)R_e]\approx51.3k\Omega$，$\dot{A}_u\approx-\dfrac{R_c/\!/R_L}{R_e}=-1.5$；

$U_i=\dfrac{R_i}{R_s+R_i}\cdot U_s\approx9.6mV$，$U_o=|\dot{A}_u|U_i\approx14.4mV$。

(20) 解：图 3.39(a)不能。图 3.39(b)不能。图 3.39(c)构成 NPN 型管，上端为集电极，中端为基极，下端为发射极。图 3.39(d)不能。图 3.39(e)不能。图 3.39(f)PNP 型管，上端为发射极，中端为基极，下端为集电极。图 3.39(g)构成 NPN 型管，上端为集电极，中端为基极，下端为发射极。

第4章

场效应管放大电路



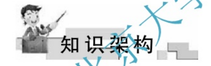
学习目的与要求

(1) 熟练掌握N沟道增强型MOS场效应管、N沟道结型场效应管共源接法的转移特性曲线。

(2) 理解单极型场效应管的主要参数及注意事项。

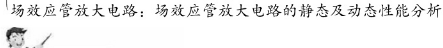
(3) 熟练掌握用估算法计算场效应管放大电路的静态工作点。

(4) 熟练掌握共漏电路(包括分压式偏置电路)和共源场效应管放大电路的工作原理,正确运用微变等效电路分析计算增益、输入电阻、输出电阻。



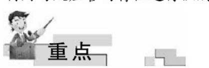
知识架构

- 场效应管的结构及工作原理
  - 结型场效应管的结构及工作原理
  - 金属-氧化物-半导体场效应管的结构及工作原理
- 场效应管放大电路:场效应管放大电路的静态及动态性能分析



难点

利用场效应管的特性进行识别。



重点

用小信号模型进行动态指标计算,特别注意 g_m 的处理。



4.1 知识要点

4.1.1 MOS场效应管

MOS管的栅场与半导体之间隔有二氧化硅(SiO_2)绝缘介质，故又称绝缘栅场效应管，输入电阻可高达$10^{15}\Omega$。制造工艺简单，适于制造集成电路。

MOS管也有N沟道和P沟道之分，又可分为增强型和耗尽型两种。

增强型MOS管在栅源电压$u_{GS}=0$V时，漏源极之间没有导电沟道存在。

耗尽型MOS管在$u_{GS}=0$V时，漏源极间就有导电沟道存在。

1. 增强型MOS管

1）符号

N沟道、P沟道增强型MOS管符号分别如图4.1(a)、(b)所示。

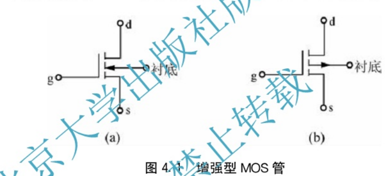


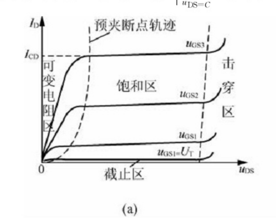
图4.1 增强型MOS管

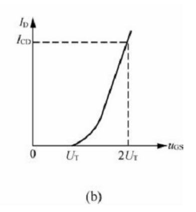
(a) N沟道增强型MOS管符号；(b) P沟道增强型MOS管符号

2）$V-I$特性曲线和转移特性曲线

输出特性曲线：$i_D=f(u_{DS})\Big|_{u_{GS}=C}$，如图4.2(a)所示。

转移特性曲线：$i_D=f(u_{GS})\Big|_{u_{DS}=C}$，如图4.2(b)所示。





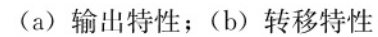


图4.2 N沟道增强型MOS管输出特性和转移特性

(a) 输出特性；(b) 转移特性





2. N沟道耗尽型MOS管

1）符号

N沟道耗尽型MOS管符号如图4.3所示。

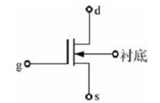


图4.3　N沟道耗尽型MOS管

3. 主要参数

1）直流参数

开启电压U_T或$U_{GS(th)}$(增强型MOS管)、夹断电压U_P或$U_{GS(off)}$(耗尽型MOS)：u_{DS}为某一固定值，使i_D等于某一微小电流时，栅源极间所加的电压。

饱和漏极电流I_{DSS}(耗尽型MOS)：在$u_{GS}=0$的条件下，当$|u_{DS}|>|U_P|$时(饱和区)的漏极电流。

直流输入电阻R_{GS}：漏源极间短路条件下，栅源极间加一定电压时的栅源直流电阻。

2）交流参数

输出电阻r_{ds}：$r_{ds}=\left.\frac{\partial u_{DS}}{\partial i_D}\right|_{u_{DS}=C}$，在饱和区内，$i_D$几乎不随$u_{DS}$变化，$r_{ds}$很大。

低频跨导g_m：$g_m=\left.\frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}}\right|_{u_{DS}=C}$，反映栅源电压对漏极电流的控制能力，表征场效应管的放大能力。

3）极限参数

最大漏极电流I_{DM}：

漏极最大耗散功率P_{DM}

最大漏源电压$U_{(BR)DS}$：沟道发生雪崩击穿，i_D急剧上升时的u_{DS}值。

最大栅源电压$U_{(BR)GS}$：栅源极间的PN结发生反向击穿时的u_{GS}值。

4.1.2　MOS场效应管放大电路

1. 共源放大电路

1）直流偏置电路及静态分析

(1) 分压式偏置电路：适用于结型或增强型、耗尽型MOS管，电路如图4.4(a)所示。



$$U_{GSQ}=U_G-U_S=\frac{R_{g2}}{R_{g1}+R_{g2}}U_{DD}-I_{DQ}R$$

$$I_{DQ}=I_{DO}\left(\frac{U_{GSQ}}{U_T}-1\right)^2$$

$$U_{DSQ}=U_{DD}-I_{DQ}(R_D+R)$$

（2）自偏压电路：适用于耗尽型 MOS 管、JFET，电路如图 4.4(b)所示。

$$U_{GSQ}=U_G-U_S=-I_{DQ}R_d$$

$$I_{DQ}=I_{DSS}\left(\frac{U_{GSQ}}{U_P}-1\right)^2$$

$$U_{DSQ}=U_{DD}-I_{DQ}(Ri_D+R_S)$$

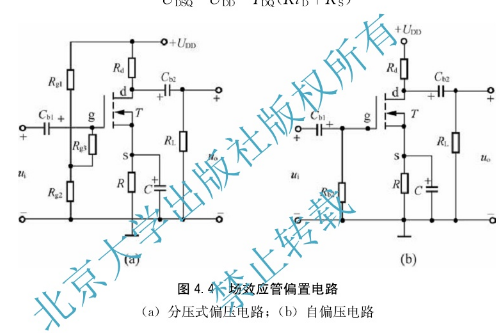


图 4.4　场效应管偏置电路

（a）分压式偏压电路；（b）自偏压电路

2）场效应管的小信号等效模型

场效应管的小信号等效模型如图 4.5 所示。

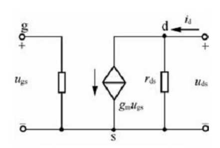


图 4.5　场效应管的等效模型

场效应管放大电路有 3 种基本组态，即共源极、共漏极和共栅极放大电路(由于共栅连接时，栅极与沟道间的高阻未能发挥作用，故共栅电路很少使用)。

3）小信号模型分析

共源放大电路的小信号等效电路如图 4.6 所示。





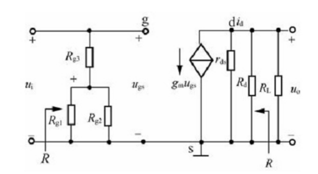


图 4.6　共源放大电路的小信号等效电路

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=\frac{-g_m u_{gs}(r_{ds}\parallel R_d\parallel R_L)}{u_{gs}}=-g_m(r_{ds}\parallel R_d\parallel R_L)$$

$$R_i=R_{g3}+R_{g1}\parallel R_{g2}$$

$$R_o=r_{ds}\parallel R_d$$

2. 共漏放大电路(源极电压跟随器)

共漏放大电路及其小信号等效电路如图 4.7 所示。

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=\frac{g_m u_{gs}(r_{ds}\parallel R_d\parallel R_L)}{u_{gs}+g_m u_{gs}(r_{ds}\parallel R_d\parallel R_L)}=\frac{g_m(r_{ds}\parallel R_d\parallel R_L)}{1+g_m(r_{ds}\parallel R_d\parallel R_L)}$$

$$R_i=R_{g3}+R_{g1}\parallel R_{g2}$$

$$R_o=\left.\frac{u_t}{i_t}\right|_{u_s=0}$$

$$i_t=\frac{u_t}{R}+\frac{u_t}{r_{ds}}+g_m u_{gs}=\frac{u_t}{R}+\frac{u_t}{r_{ds}}+g_m u_t$$

$$R_o=R\parallel r_{ds}\parallel\frac{1}{g_m}$$

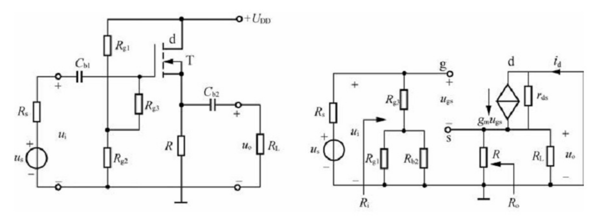


图 4.7　共漏放大电路及其小信号等效电路

场效应管共漏极放大电路电压增益小于 1，输入电阻高，输出电阻低，可作阻抗变换用。

4.1.3 结型场效应管

1. JFET 的结构和特性曲线

1）符号

N 沟道结型场效应管的符号如图 4.8 所示。

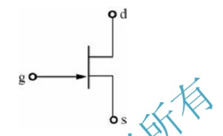


图 4.8 N 沟道的结型场效应管

结型场效应管的输入电阻可达 $10^6 \sim 10^9\,\Omega$。

2）结型场效应管 $V-I$ 特性曲线和转移特性曲线

N 沟道结型场效应管的输出特性曲线如图 4.9 所示。

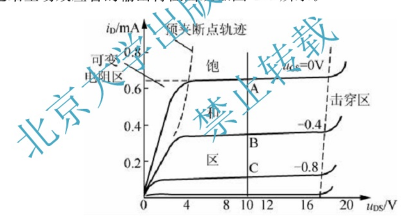


图 4.9 N 沟道结型场效应管的输出特性曲线

输出特性曲线：$i_D = f(u_{DS})\big|_{u_{GS}=C}$。

转移特性曲线：$i_D = f(u_{GS})\big|_{u_{DS}=C}$。

在饱和区内，不同 u_{DS}下的转移特性曲线几乎重合，如图 4.10 所示。

3）使用注意事项

(1) JFET 的 u_{GS}不能接反，可开路保存。

(2) MOS 管栅-衬间的电容小，感应电荷易形成高电压，栅源电阻 R_{GS}很大，不易放电，易将栅源间绝缘层击穿，造成 MOS 管损坏。栅源间应提供直流通路或双向稳压管保护。

(3) 焊接时，电烙铁应有外接地线；焊接 MOS 管时，最好断电。



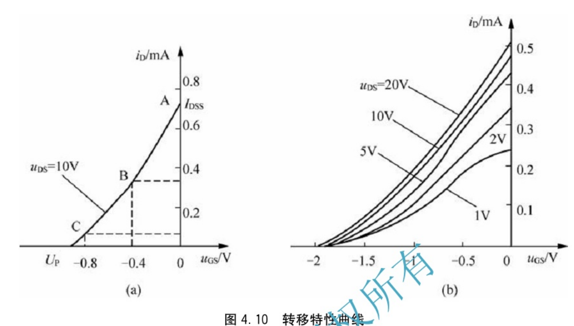


图 4.10 转移特性曲线

(a) u_{DS}=10V 时的转移特性曲线；(b) u_{DS}取不同值时的转移特性曲线

4.1.4 各种放大器件电路性能比较

场效应管和双极型晶体管的比较如下所述。

(1) 场效应管的源极 s、栅极 g、漏极 d 分别对应于三极管的发射极 e、基极 b、集电极 c，作用相似。

(2) 场效应管是电压控制电流器件，由 u_{GS} 控制 i_D，g_m 一般较小，放大能力较差。三极管是电流控制电流器件，由 i_B(或 i_E)控制 i_C。

(3) 场效应管的输入电阻比三极管的输入电阻高。

(4) 场效应管只有多子参与导电；三极管有多子和少子两种载流子参与导电。少子浓度受温度、辐射等因素影响较大，因而场效应管比晶体管的温度稳定性好且抗辐射能力强。

(5) 场效应管在源极不与衬底连在一起时，源极和漏极可以互换使用。三极管的集电极与发射极互换使用时，其特性差异很大，β 值将减小很多。

(6) 场效应管的噪声系数很小。

(7) 共源电路、共漏电路、共栅电路分别与共射电路、共集电路、共基电路相对应。

(8) 共源与共射电路均有电压放大作用，输出电压与输入电压相位相反，统称为反相电压放大器。

(9) 共漏与共集电路 $|\dot{A}_{UM}|=1$，输出电压与输入电压同相位，可称为电压跟随器。

(10) 共栅和共基电路输出电流与输入电流接近相等，可称为电流跟随器。

4.2 典型例题分析

例题 1：电路如图 4.11 所示，设 $R_{g1}=90\text{k}\Omega$，$R_{g2}=60\text{k}\Omega$，$R_{d}=30\text{k}\Omega$，$U_{DD}=5\text{V}$，$U_{T}=1\text{V}$，$K_{n}=0.1\text{mA/V}^2$。试计算电路的源电压 U_{GS} 和漏源电压 U_{DS}。

解：

$$U_{GS}=\frac{R_{g2}}{R_{g1}+R_{g2}}U_{DD}=\frac{60}{90+60}\times5=2\text{V}$$

$$I_{D}=K_{n}\ (U_{GS}-U_{T})^2=0.1\ (2-1)^2=0.1\text{mA}$$

$$U_{DS}=U_{DD}-I_{D}R_{d}=5-0.1\times30=2\text{V}$$

图 4.11　例题 1 图

例题 2：电路如图 4.12(a)所示。已知 $R_{d}=10\text{k}\Omega$，$R_{s}=\text{R}=0.5\text{k}\Omega$，$R_{g1}=165\text{k}\Omega$，$R_{g2}=35\text{k}\Omega$，$U_{T}=0.8\text{V}$，$K_{n}=1\text{mA/V}^2$，场效应管的输出电阻 $r_{ds}=\infty(\lambda=0)$，电路静态工作点处 $U_{GS}=1.5\text{V}$。试求电路的小信号电压增益 $A_{u}=u_{o}/u_{i}$ 和源电压增益 $A_{us}=u_{o}/u_{s}$。（提示：先根据 K_{n}、U_{GS} 和 U_{T} 求出 g_{m}，再求 A_{u}）。

解：MOSFET 放大电路小信号等效电路如图 4.12(b)所示。

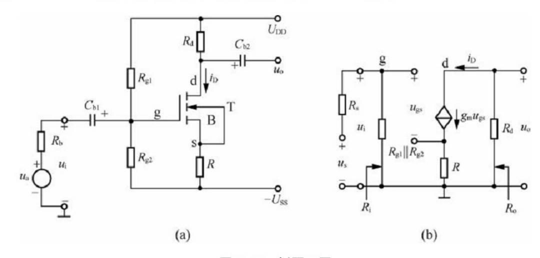


图 4.12　例题 2 图

$$g_m = 2K_N(U_{GS} - U_T) = 2 \times 1(1.5 - 0.8) = 1.4\text{ms}$$

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-g_m R_d}{1 + g_m R} = \frac{-1.4 \times 10}{1 + 1.4 \times 0.5} = -8.24$$

$$R_i = R_{g1} /\!/ R_{g2} = 28.9\text{k}\Omega$$

$$A_{us} = \frac{u_o}{u_s} = \frac{u_o}{u_i} \cdot \frac{u_i}{u_s} = A_u \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i} = -8.24 \cdot \frac{28.9}{0.5 + 28.9} = -8.1$$

例题 3：电路如图 4.13(a)所示。设 $R = 0.75\text{k}\Omega$，$R_{g1} = R_{g2} = 240\text{k}\Omega$，$R_s = 4\text{k}\Omega$。场效应管的 $g_m = 11.3\text{ms}$，$r_{ds} = 50\text{k}\Omega$。试求源极跟随器的源电压增益 $A_{us} = u_o/u_s$、输入电阻 R_i和输出电阻 R_o。

解：MOSFET 放大电路及其小信号等效电路如图 4.13(b)所示，这是共漏放大电路，是电压跟随器。

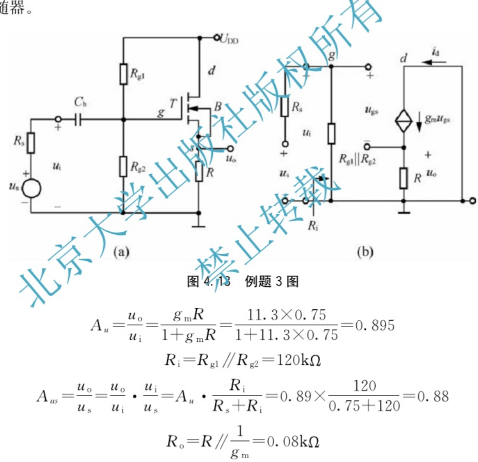


图 4.13　例题 3 图

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{g_m R}{1 + g_m R} = \frac{11.3 \times 0.75}{1 + 11.3 \times 0.75} = 0.895$$

$$R_i = R_{g1} /\!/ R_{g2} = 120\text{k}\Omega$$

$$A_{us} = \frac{u_o}{u_s} = \frac{u_o}{u_i} \cdot \frac{u_i}{u_s} = A_u \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i} = 0.89 \times \frac{120}{0.75 + 120} = 0.88$$

$$R_o = R /\!/ \frac{1}{g_m} = 0.08\text{k}\Omega$$

例题 4：已知电路参数如图 4.14(a)所示，FET 工作点上的互导 $g_m = 1\text{ms}$，设 $r_{ds} \gg R_d$。(1)画出电路的小信号等效电路；(2)求电压增益 A_u；(3)求放大器的输入电阻 R_i。

解：(1) MOSFET 放大电路及其小信号等效电路如图 4.14(b)所示，这是共源放大电路，是反向电压放大器。

(2) $A_u = \dfrac{u_o}{u_i} = \dfrac{-g_m R_d}{1 + g_m R_1} = -\dfrac{1 \times 10}{1 + 1 \times 2} = -3.3$

(3) $R_i = R_{g3} + R_{g1} /\!/ R_{g2} = 2075\text{k}\Omega$

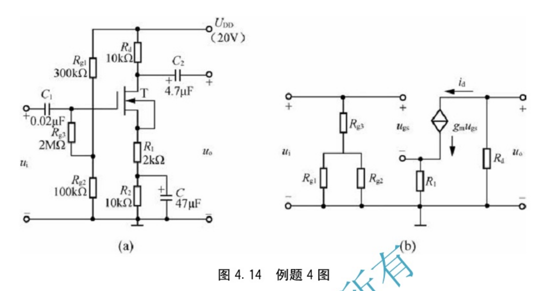


图 4.14 例题 4 图

例题 5：源极输出器电路如图 4.15(a)所示。已知 FET 工作点上的互导 $g_m=0.9$ms，其他参数如图 4.15(a)所示。求电压增益 A_u、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o。

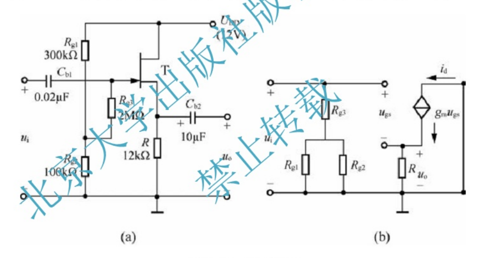


图 4.15 例题 5 图

解：放大电路及其小信号等效电路如图 4.15(b)所示，这是共漏放大电路，是电压跟随器。

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=\frac{g_m R}{1+g_m R}=\frac{0.9\times 12}{1+0.9\times 12}=0.92$$

$$R_i=R_{g3}+R_{g1}/\!/R_{g2}=2075\text{k}\Omega$$

$$R_o=R/\!/\frac{1}{g_m}=1\text{k}\Omega$$

例题 6：已知如图 4.16(a)所示，电路中场效应管的转移特性和输出特性分别如图 4.16(b)、(c)所示。(1)利用图解法求解 Q 点；(2)利用等效电路法求解 A_u、R_i 和 R_o。

解：(1) 在转移特性中作直线 $u_{GS}=-i_D R_S$，与转移特性的交点即为 Q 点；读出坐标值，得出 $I_{DQ}=1$mA，$U_{GSQ}=-2$V，如图 4.17(a)所示。



图 4.16　例题 6 图

图 4.17　图解法求 Q 点图

在输出特性中作直流负载线 $u_{DS}=U_{DD}-i_D(R_d+R_S)$，与 $U_{GSQ}=-2\text{V}$ 的那条输出特性曲线的交点为 Q 点，$U_{DSQ}\approx 3\text{V}$，如图 4.17(b)所示。

(2) 首先画出交流等效电路(图略)，然后进行动态分析。

$$g_m=\frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}}\bigg|_{U_{DS}}=\frac{-2}{U_{GS(off)}}\sqrt{I_{DSS}I_{DQ}}=1\text{mA/V};$$

$\dot{A}_u=-g_mR_D=-5$，$R_i=R_g=1\text{M}\Omega$，$R_o=R_d=5\text{k}\Omega$。

例题 7：电路如图 4.18 所示，已知场效应管的低频跨导为 g_m，试写出 A_u、R_i和 R_o 的表达式。





解： A_u、R_i和R_o的表达式分别为

$$A_u = -g_m(R_d // R_L)$$
$$R_i = R_3 + R_1 // R_2$$
$$R_o = R_d$$

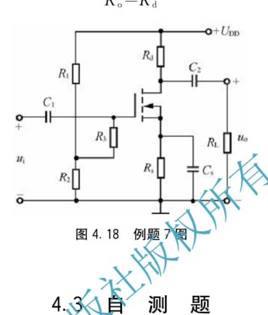


图 4.18 例题 7 图

4.3 自　测　题

自测题一： 判断下列说法是否正确。

(1) 结型场效应管外加的栅-源电压应使栅-源间的耗尽层承受反向电压，才能保证其R_{GS}大的特点。（　）

(2) 若耗尽型 N 沟道 MOS 管的U_{GS}大于零，则其输入电阻会明显变小。（　）

解： (1) ×　(2) ×

自测题二： 选择正确答案填入空内。

(1) $U_{GS}=0$V 时，不能够工作在恒流区的场效应管有________。

A. 结型管　　B. 增强型 MOS 管　　C. 耗尽型 MOS 管

(2) 当场效应管的漏极直流电流I_D从 2mA 变为 4mA 时，它的低频跨导g_m将________。

A. 增大　　B. 不变　　C. 减小

解： (1) B　(2) A

自测题三： 分析计算题。

(1) 改正图 4.19 所示各电路中的错误，使它们有可能放大正弦波电压。要求保留电路的共源接法。

解： (a) 源极加电阻R_s。(b) 漏极加电阻R_d。

(c) 输入端加耦合电容。(d) 在R_g支路加$-U_{GG}$，$+U_{DD}$改为$-U_{DD}$。

改正电路如图 4.20 所示。



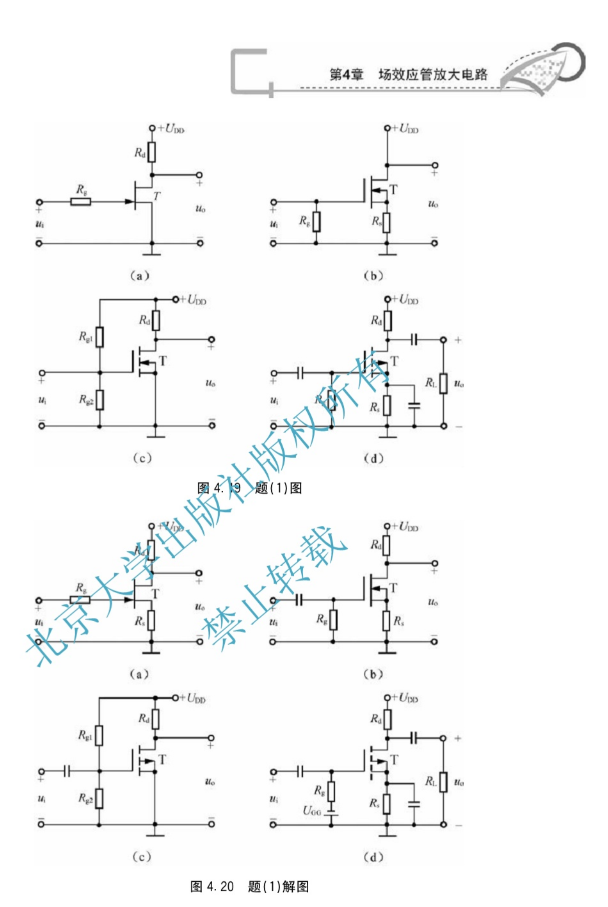


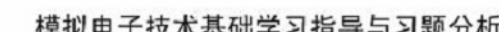
图 4.19　题(1)图

图 4.20　题(1)解图

(2) 已知图 4.21(a)所示电路中场效应管的转移特性如图 4.21(b)所示。求解电路的 Q 点和 A_u。

解： 求 Q 点：

根据电路图可知，$U_{GSQ}=U_{GG}=3\text{V}$。



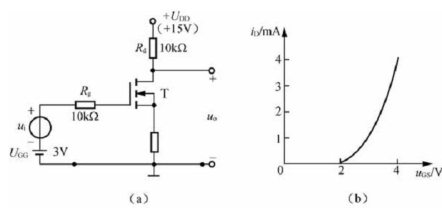



图 4.21　题(2)图

从转移特性查得，$U_{GSQ}=3V$ 时的漏极电流 $I_{DQ}=1mA$。

因此管压降 $U_{DSQ}=U_{DD}-I_{DQ}R_d=5V$。

求电压放大倍数为



$$g_m=\frac{2}{U_{GS(th)}}\sqrt{I_{DQ}I_{DO}}=2mA/V,\ A_u=-g_mR_d=-20$$

4.4　练　习　题

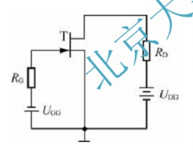


图 4.22　题(1)图

(1) 电路如图 4.22 所示。已知 $U_{DD}=12V$，$U_{GG}=2V$，$R_G=100k\Omega$，$R_D=1k\Omega$，场效应管 T 的 $I_{DSS}=8mA$、$U_{GS(off)}=-4V$。求该场效应管的 I_{DQ}及静态工作点处的 g_m值。

(2) 已知某种场效应管的参数为 $U_{GS(th)}=2V$，$U_{(BR)GS}=30V$，$U_{(BR)DS}=15V$，当 $U_{GS}=4V$、$U_{DS}=5V$ 时，该场效应管的 $I_{DQ}=9mA$。现用这种场效应管接成如图 4.23 所示的 4 种电路，电路中的 $R_G=100k\Omega$，$R_{D1}=5.1k\Omega$，$R_{D2}=3.3k\Omega$，$R_{D3}=2.2k\Omega$，$R_S=1k\Omega$。试问各电路中的场效应管各工作于放大、截止、可变电阻、击穿 4 种状态中的哪一种状态?

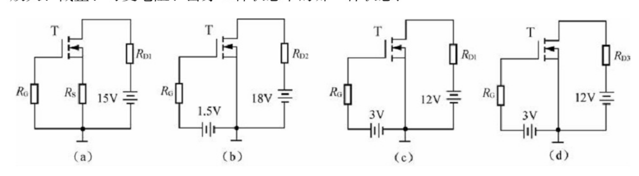


图 4.23　题(2)图

（3）试判断图 4.24 所示的 4 种电路中，哪个(或哪几个)电路具有电压放大作用。

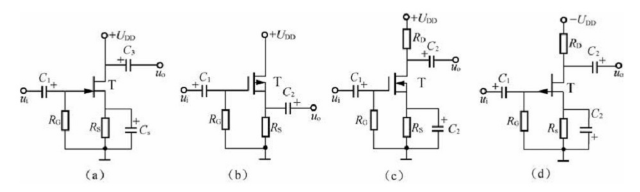


图 4.24　题(3)图

（4）电路如图 4.25 所示，其中 $-U_{DD}=-20V$，$R_G=1M\Omega$，$R_D=10k\Omega$，$U_{GSQ}=2V$，该场效应管的 $I_{DSS}=-2mA$、$U_{GS(off)}=4V$，各电容器的电容量均足够大。试求：①I_{DQ}及R_{S1}的数值；②为使该效应管能工作于恒流区，R_{S2}不能超过什么值。

（5）电路如图 4.26 所示，已知 $U_{DD}=30V$，$R_{G1}=R_{G2}=1M\Omega$，$R_D=10k\Omega$，该场效应管的$U_{GS(th)}=3V$，且当$U_{GS}=5V$时I_D为 0.8mA。试求该场效应管的U_{GSQ}、I_{DQ}、U_{DSQ}。

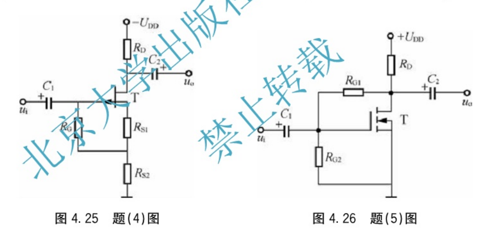


图 4.25　题(4)图　　　　图 4.26　题(5)图

（6）电路如图 4.27 所示，已知 $-U_{DD}=-40V$，$R_G=1M\Omega$，$R_D=12k\Omega$，$R_S=1k\Omega$，场效应管的 $I_{DSS}=-6mA$、$U_{GS(off)}=6V$、$r_{ds}\gg R_D$，各电容器的电容量均足够大。试求：①电路静态时的 I_{DQ}、U_{GSQ}、U_{DQ}值；②电路的 A_u、R_i、R_o值。

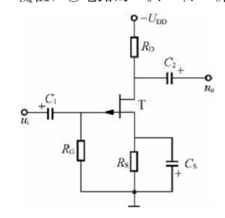


图 4.27　题(6)图

(7) 电路如图 4.28 所示，其中 $R_G=1.1\text{M}\Omega$，$R_S=10\text{k}\Omega$，场效应管的 $g_m=0.9\text{ms}$、r_{ds}可以忽略，各电容器的电容量均足够大，电源电压 U_{DD}的大小已足以保证该场效应管能工作于恒流区。试求 A_u、R_i和 R_o的值。

(8) 在图 4.29 所示的电路中，$R_D=R_S=5.1\text{k}\Omega$，$R_{G2}=1\text{M}\Omega$，$U_{DD}=24\text{V}$，场效应管的 $I_{DSS}=2.4\text{mA}$、$U_{GS(off)}=-6\text{V}$，各电容器的电容量均足够大。若要求该场效应管的 $U_{GSQ}=1.8\text{V}$，求

① R_{G1}的数值。

② I_{DQ}的值。

③ $A_{u1}=\dfrac{U_{o1}}{U_i}$ 及 $A_{u2}=\dfrac{U_{o2}}{U_i}$ 的值。

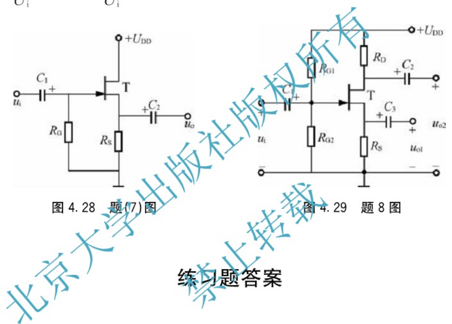


图 4.28 题(7)图　　图 4.29 题 8 图

练习题答案

(1) 解：$I_{DQ}=2\text{mA}$，$g_m=2\text{ms}$。

(2) 解：先求场效应管的 K 值。由已知的 $U_{GS}=4\text{V}$ 时 $I_{DQ}=9\text{mA}$ 及 $U_{GS(th)}=2\text{V}$，代入公式 $i_D=K[u_{GS}-U_{GS(th)}]^2$，可求得 $K=2.25\text{mA/V}^2$。

图 4.23(a)管子击穿；图 4.23(b)管子击穿；图 4.23(c)可变电阻区；图 4.23(d)放大区。

(3) 解：图 4.24 中所示的图(d)。

(4) 解：图 4.25(a)$I_{DQ}=-0.5\text{mA}$，$R_{S1}=4\text{k}\Omega$；(b)$R_{S2}<22\text{k}\Omega$。

(5) 解：$I_{DQ}=1.8\text{mA}$；$U_{DSQ}=12\text{V}$；$U_{GSQ}=6\text{V}$。

(6) 解：(a)$I_{DQ}=-2.3\text{mA}$；$U_{DQ}=-12.4\text{V}$；$U_{DSQ}=-10.1\text{V}$。

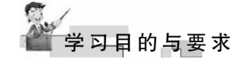
(b)$A_u=-14.9$，$R_i=1\text{M}\Omega$，$R_o=12\text{k}\Omega$。

(7) 解：$A_u=0.9$；$R_i=1.1\text{M}\Omega$；$R_o=1\text{k}\Omega$。

(8) 解：(a)$R_{G1}=4.7\text{M}\Omega$；(b)$I_{DQ}=1.18\text{mA}$；(c)$A_{u1}=\dfrac{u_{o1}}{u_i}=0.74$，$A_{u2}=\dfrac{u_{o2}}{u_i}=-0.74$。

第5章

功率放大电路



学习目的与要求

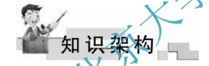
(1) 熟悉功率放大电路的3种工作状态，即甲类、乙类和甲乙类的工作特点。

(2) 熟练掌握OTL甲乙类互补功率放大电路、OCL准互补功率放大电路的工作原理。

(3) 熟练掌握复合管、互补电路的正确接法。

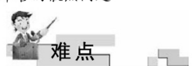
(4) 熟练掌握功率、效率、功耗和最大输出功率等的计算。

(5) 了解交越失真的概念。



知识架构

- 功率放大电路的特殊问题：功率放大电路的输出功率、效率和非线性失真之间的关系
- 乙类互补对称功率放大电路
  - 双电源基本互补对称功率放大电路(OCL)及其工作原理
  - 乙类双电源功率放大电路功率参数分析计算
- 甲乙类互补对称功率放大电路
  - 实用的甲乙类双电源互补对称功率放大电路
  - 甲乙类单电源互补对称功率放大电路(OTL)
- 集成功率放大器
- 功率放大电路应用举例
- 功率管的散热问题



难点

(1) 功率放大电路指标的计算。

(2) 最大管耗与最大输出功率的关系。

(3) 最大管耗与最大功率并非同一时间出现。



(1) 乙类互补对称功放电路组成、分析计算。

(2) 分清各类放大器工作状态的特点。

5.1 知识要点

5.1.1 功率放大电路的一般问题

1. 功率放大电路的特点及主要研究对象

功率放大电路：以输出较大功率为目的的放大电路，其直接驱动负载，且带载能力强。任何放大电路在负载上均同时存在输出电压、电流和功率，功率放大电路和电压放大电路没有本质的区别。

2. 功率放大电路的特点

(1) 要求输出功率尽可能大。

(2) 效率高。效率是负载得到的有用信号功率与电源供给的直流功率的比值。

(3) 非线性失真小。功放器件输出功率越大，非线性失真越严重，输出功率和非线性失真是一对矛盾。

(4) 功率器件的散热问题。

(5) 功率器件在接近极限运用状态下工作，参数选择与保护问题也不容忽视。

功率放大电路分析任务包括最大输出功率、最高效率及功率器件的安全工作参数的分析，通常采用图解法。

3. 功率放大电路提高效率的主要途径

1) 甲类功率放大电路

在输入正弦信号的一个周期内，都有电流流过三极管，整个周期都有 $i_C>0$。

2) 甲乙类功率放大电路

在输入正弦信号的一个周期内，有半个周期以上三极管的 $i_C>0$。

3) 乙类功率放大电路

在输入正弦信号的一个周期内，只有半个周期三极管的 $i_C>0$。

甲类放大电路：效率较低，理想情况下，效率最高只能达到 50%。



有信号输入时，电源供给功率一部分转化为有用输出功率，另一部分消耗在功率器件和电阻上，并以热量的形式耗散出去；没有信号输入时，功率全部消耗在功率器件和电阻上。

乙类和甲乙类放大电路：能减小静态功耗，提高效率，但存在波形失真，主要用于功率放大电路。静态电流是造成管耗的主要因素，把静态工作点 Q 向下移动，可使信号等于零时的电源输出功率等于零或很小。

5.1.2　乙类双电源互补对称功率放大电路(OCL)

1. 电路组成

乙类互补对称功放电路如图 5.1 所示。

图 5.1　乙类互补对称功放的电路

(a) 基本互补对称电路；(b) 由 NPN 管组成的射极输出器；(c) 由 PNP 管组成的射极输出器

电路可以看成是由两个射极输出器组合而成的。当 $u_i=0$ 时，T_1、T_2 均处于截止状态，为乙类放大电路。信号正半周时，$u_{BE1}=u_{BE2}>0$，T_2 截止，T_1 放大；信号负半周时，$u_{BE1}=u_{BE2}<0$，T_1 截止，T_2 放大，称为互补电路。为使负载上得到的波形正负半周大小相同，要求两个三极管特性完全一致，即工作性能对称。

2. 分析计算

OCL 电路图解法分析图如图 5.2 所示。

将 T_2 特性曲线倒置在 T_1 右下方，并令二者在 Q 点($u_{CE}=U_{CC}$)处重合，形成 T_1 和 T_2 合成曲线。

1) 输出功率

$$P_o=U_oI_o=\frac{U_{om}}{\sqrt{2}}\cdot\frac{U_{om}}{\sqrt{2}R_L}=\frac{U_{om}^2}{2R_L}$$

$$P_{om}=\frac{U_{om}^2}{2R_L}=\frac{(U_{CC}-U_{CES})^2}{2R_L}$$



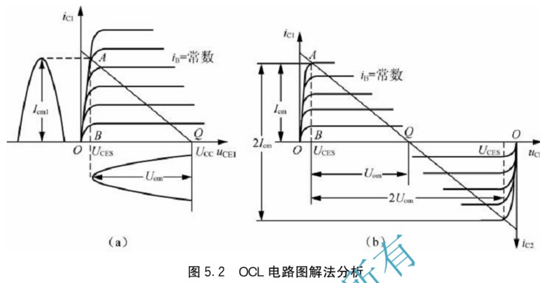


图 5.2　OCL 电路图解法分析

2）管耗

设输出电压为 $u_o=U_{om}\sin\omega t$，则 T_1 的管耗为

$$P_{T1}=\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}(U_{CC}-u_o)\frac{u_o}{R_L}d(\omega t)=\frac{1}{R_L}\left(\frac{U_{CC}U_{om}}{\pi}-\frac{U_{om}^2}{4}\right)$$

两管管耗为

$$P_T=P_{T_1}+P_{T_2}=\frac{2}{R_L}\left(\frac{U_{CC}U_{om}}{\pi}-\frac{U_{om}^2}{4}\right)$$

3）直流电源提供的功率为

$$P_U=P_o+P_T=\frac{2U_{CC}U_{om}}{\pi R_L}$$

当输出电压幅值达到最大时，电源供给的最大功率为

$$P_{Um}=\frac{2U_{CC}(U_{CC}-U_{CES})}{\pi R_L}$$

4）效率

$$\eta=\frac{P_o}{P_U}=\frac{\pi}{4}\cdot\frac{U_{om}}{U_{CC}}$$

$U_{om}\approx U_{CC}$时，$\eta=\frac{\pi}{4}\approx78.5\%$。

3. 功率管的选择

1）最大管耗

令$\frac{dP_{T_1}}{dU_{om}}=0$，当$U_{om}=\frac{2}{\pi}U_{CC}$时，$P_{T_1m}=\frac{U_{CC}^2}{\pi^2 R_L}\approx0.2P_{om}$（不计$U_{CES}$时的$P_{om}$）。

2）功率管选择

$$P_{CM}>0.2P_{om}，I_{CM}>\frac{U_{CC}}{R_L}，U_{(BR)CEO}>2U_{CC}$$



5.1.3 甲乙类互补对称功率放大电路

甲乙类双电源互补对称电路如图5.3所示。

由于乙类互补对称电路存在交越失真，如图5.4所示。而甲乙类互补对称电路利用偏置电路可克服交越失真。静态时，在D_1、D_2上产生的压降为T_1、T_2提供了一个适当的偏压，使之处于微导通状态。由于电路对称，故静态时$i_{C1}=i_{C2}$，$i_L=0$，$u_o=0$。

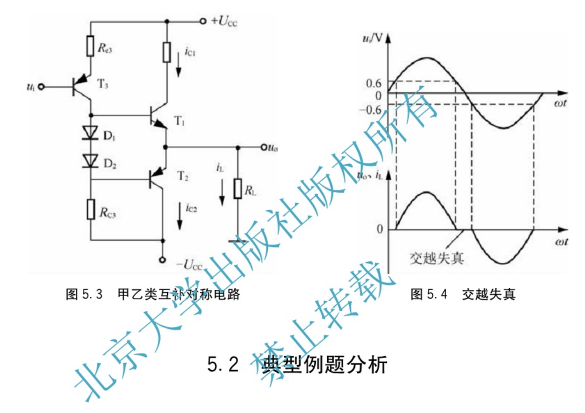


图5.3 甲乙类互补对称电路　　图5.4 交越失真

5.2 典型例题分析

例题1：在甲类、乙类和甲乙类放大电路中，放大管的导通角分别等于多少？它们中哪一类放大电路效率最高？

解：在输入正弦信号情况下，通过三极管的电流i_c不出现截止状态(即导通角$\theta=2\pi$)的称为甲类；在正弦信号一个周期中，三极管只有半个周期导通($\theta=\pi$)的称为乙类；导通时间大于半周而小于全周($\pi<\theta<2\pi$)的称为甲乙类。其中工作于乙类的放大电路效率最高，在双电源的互补对称电路中，理想情况下其最高效率可达78.5%。

例题2：一双电源互补对称电路如图5.5所示，已知$U_{CC}=12V$，$R_L=16\Omega$，u_i为正弦波。求：①在BJT的饱和压降U_{CES}可以忽略不计的条件下，负载上可能得到的最大输出功率P_{om}；②每个管子允许的管耗P_{CM}至少应为多少？③每个管子的耐压$|U_{(BR)CEO}|$应大于多少？

解：1）输出功率

$$P_o=U_oI_o=\frac{U_{om}}{\sqrt{2}}\times\frac{U_{om}}{\sqrt{2}R_L}=\frac{1}{2}\times\frac{U_{om}^2}{R_L}$$

当$U_{om}=U_{CC}$时，输出最大功率为

$$P_{om}=\frac{1}{2}\frac{U_{CC}^2}{R_L}=\frac{1}{2}\times\frac{12^2}{16}W=4.5W$$

2）每个管子允许的管耗为

$$P_{CM}>0.2P_{om}=0.2\times4.5=0.9W$$

3）每管的耐压

$$|U_{(BR)CEO}|>2U_{CC}=2\times12V=24V$$

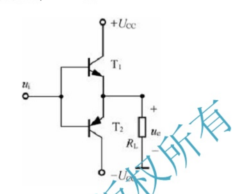


图 5.5　双电源互补对称电路

例题 3：在图 5.5 所示电路中，设 u_i 为正弦波，$R_L=8\Omega$，要求最大输出功率 $P_{om}=9W$。试在 BJT 的饱和压降 U_{CES} 可以忽略不计的条件下，求：①正、负电源 U_{CC} 的最小值；②根据所求 U_{CC} 最小值，计算相应的 I_{CM}、$|U_{(BR)CEO}|$ 的最小值；③输出功率最大时，电源供给的功率 P_U；④每个管子允许的管耗 P_{CM} 的最小值；⑤输出功率最大时的输入电压有效值。

解：(1) 由 $P_{om}=\frac{1}{2}\frac{U_{CC}^2}{R_L}$，可得：$U_{CC}\geqslant\sqrt{2R_LP_{om}}=12V$。

(2) $I_{CM}\geqslant\frac{U_{CC}}{R_L}=\frac{12V}{8\Omega}=1.5A$，$|U_{(BR)CEO}|\geqslant2U_{CC}=24V$。

(3) $P_U=\frac{2U_{CC}^2}{\pi R_L}\approx11.46W$。

(4) $P_{CM}\geqslant0.2P_{om}=0.2\times9W=1.8W$。

(5) $U_i\approx U_o=\frac{U_{CC}}{\sqrt{2}}=8.49V$。

例题 4：设电路如图 5.5 所示，管子在输入信号 u_i 作用下，在一周期内 T_1 和 T_2 轮流导电约半周期，电源电压 $U_{CC}=20V$，负载 $R_L=8\Omega$，试计算：①在输入信号 $U_i=10V$(有效值)时，电路的输出功率、管耗、直流电源供给的功率和效率；②当输入信号 u_i 的幅值为 $U_{im}=U_{CC}=20V$ 时，电路的输出功率、管耗、直流电源供给的功率和效率。

解：(1) $U_i=10V$ 时，$U_{om}=U_{im}=\sqrt{2}\times10V=14V$。

输出功率：$P_o=\frac{U_{cem}^2}{2R_L}=\frac{U_{om}^2}{2R_L}=\frac{14^2}{2\times8}=12.25W$。

每个管子的管耗：$P_{T_1}=P_{T_2}=\frac{1}{R_L}\left(\frac{U_{CC}U_{om}}{\pi}-\frac{U_{om}^2}{4}\right)\approx5.02W$。



两管总管耗：$P_T = P_{T_1} + P_{T_2} = 10.04\text{W}$。

电源供给的功率 P_U：$P_U = P_o + P_T = 12.25\text{W} + 10.04\text{W} = 22.29\text{W}$。

效率 η：$\eta = \dfrac{P_o}{P_U} = \dfrac{\pi}{4} \cdot \dfrac{U_{om}}{U_{CC}} \times 100\% = 54.96\%$。

(2) $U_{om} = A_u U_{im} = U_{CC} = 20\text{V}$ 时，

输出功率：$P_o = \dfrac{{U_{CC}}^2}{2R_L} = 25\text{W}$。

管耗：$P_T = P_{T_1} + P_{T_2} = \dfrac{2}{R_L}\left(\dfrac{U_{CC}U_{om}}{\pi} - \dfrac{{U_{om}}^2}{4}\right) = 6.85\text{W}$。

电源供给的功率 P_U：$P_U = P_o + P_T = 25\text{W} + 6.85\text{W} = 31.85\text{W}$。

效率 η：$\eta = \dfrac{P_o}{P_U} \times 100\% = 78.5\%$。

例题5：一单电源互补对称功放电路如图5.6所示，设 u_i 为正弦波，$R_L = 8\Omega$，管子的饱和压降 U_{CES} 可忽略不计。试求最大不失真输出功率 P_{om}（不考虑交越失真）为9W时，电源电压 U_{CC} 至少应为多大？

解：

$$P_{om} = \frac{(U_{CC}/2)^2}{2R_L} = \frac{{U_{CC}}^2}{8R_L}$$

则有

$$U_{CC} \geqslant \sqrt{8R_L P_{om}} = 24\text{V}$$

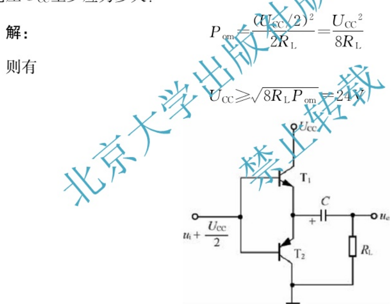


图5.6　单电源互补对称功放

5.3　自　测　题

自测题一：判断下列说法是否正确。

(1) 在功率放大电路中，输出功率越大，功放管的功耗越大。　（　　）

(2) 功率放大电路的最大输出功率是指在基本不失真的情况下，负载上可能获得的最大交流功率。　（　　）



（3）当 OCL 电路的最大输出功率为 1W 时，功放管的集电极最大耗散功率应大于 1W。（　）

（4）功率放大电路与电压放大电路、电流放大电路的共同点是

① 都使输出电压大于输入电压。（　）

② 都使输出电流大于输入电流。（　）

③ 都使输出功率大于信号源提供的输入功率。（　）

（5）功率放大电路与电压放大电路的区别是

① 前者比后者电源电压高。（　）

② 前者比后者电压放大倍数数值大。（　）

③ 前者比后者效率高。（　）

④ 在电源电压相同的情况下，前者比后者的最大不失真输出电压大。（　）

（6）功率放大电路与电流放大电路的区别是

① 前者比后者电流放大倍数大。（　）

② 前者比后者效率高。（　）

③ 在电源电压相同的情况下，前者比后者的输出功率大。（　）

解：（1）×　（2）√　（3）×　（4）×　×　√　（5）×　×　√　√

（6）×　√　√

自测题二：选择正确答案填入空内。

（1）功率放大电路的最大输出功率是在输入电压为正弦波且输出基本不失真情况下，负载上可能获得的最大________。

A. 交流功率　　B. 直流功率　　C. 平均功率

（2）功率放大电路的转换效率是指________。

A. 输出功率与晶体管所消耗的功率之比

B. 最大输出功率与电源提供的平均功率之比

C. 晶体管所消耗的功率与电源提供的平均功率之比

（3）在 OCL 乙类功放电路中，若最大输出功率为 1W，则电路中功放管的集电极最大功耗约为________。

A. 1W　　B. 0.5W　　C. 0.2W

（4）在选择功放电路中的晶体管时，应当特别注意的参数有________。

A. β　　B. I_{CM}　　C. I_{CBO}

D. $U_{(BR)CEO}$　　E. P_{CM}　　F. f_{BW}

（5）若图 5.7 所示电路中晶体管的饱和管压降的数值为 $|U_{CES}|$，则最大输出功率 P_{OM}=________。

A. $\dfrac{(U_{CC}-U_{CES})^2}{2R_L}$　　B. $\dfrac{\left(\frac{1}{2}U_{CC}-U_{CES}\right)^2}{R_L}$　　C. $\dfrac{\left(\frac{1}{2}U_{CC}-U_{CES}\right)^2}{2R_L}$



（6）电路如图 5.8 所示，T_1 和 T_2 的饱和压降 $|U_{CES}|=3V$，$U_{CC}=15V$，$R_L=8\Omega$，选择正确答案填入空内。

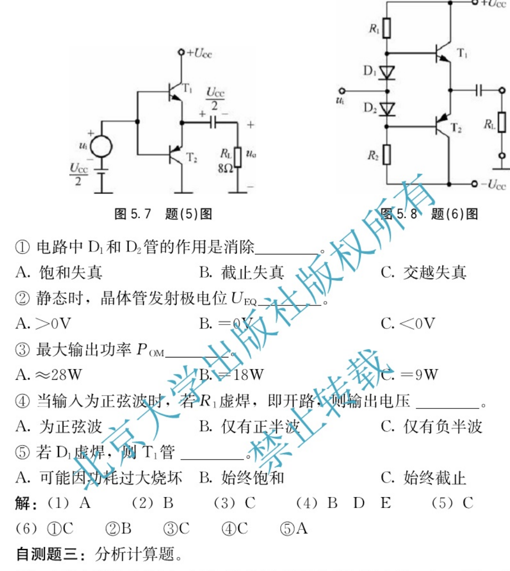


图 5.7　题(5)图　　图 5.8　题(6)图

① 电路中 D_1 和 D_2 管的作用是消除________。

A. 饱和失真　　B. 截止失真　　C. 交越失真

② 静态时，晶体管发射极电位 U_{EQ}________。

A. >0V　　B. =0V　　C. <0V

③ 最大输出功率 P_{OM}________。

A. ≈28W　　B. =18W　　C. =9W

④ 当输入为正弦波时，若 R_1 虚焊，即开路，则输出电压 ________。

A. 为正弦波　　B. 仅有正半波　　C. 仅有负半波

⑤ 若 D_1 虚焊，则 T_1 管 ________。

A. 可能因功耗过大烧坏　　B. 始终饱和　　C. 始终截止

解：（1）A　（2）B　（3）C　（4）B　D　E　（5）C

（6）①C　②B　③C　④C　⑤A

自测题三：分析计算题。

（1）电路如图 5.9 所示，已知 T_1 和 T_2 的饱和管压降 $|U_{CES}|=2V$，直流功耗可忽略不计。

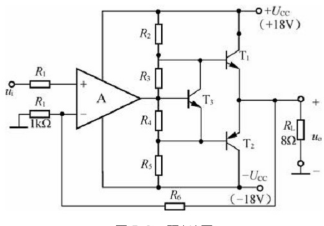


图 5.9　题(1)图

回答下列问题：①R_3、R_4和T_3的作用是什么？②负载上可能获得的最大输出功率P_{om}和电路的转换效率η各为多少？③设最大输入电压的有效值为1V，为了使电路的最大不失真输出电压的峰值达到16V，电阻R_6至少应取多少千欧？

解：① 消除交越失真。

② 最大输出功率和效率分别为

$$P_{om}=\frac{(U_{CC}-U_{CES})^2}{\sqrt{2}R_L}=16\text{W}$$

$$\eta=\frac{\pi}{4}\cdot\frac{U_{CC}-U_{CES}}{U_{CC}}\approx 69.8\%$$

③ 电压放大倍数为

$$A_u=\frac{U_{omax}}{\sqrt{2}U_i}\approx 11.3$$

$$A_u=1+\frac{R_6}{R_1}\approx 11.3$$

$R_1=1\text{k}\Omega$，故R_5至少应取10.3kΩ。

(2) 在图5.8所示电路中，已知$U_{CC}=16\text{V}$，$R_L=4\Omega$，T_1和T_2管的饱和管压降$|U_{CES}|=2\text{V}$，输入电压足够大。试问：①最大输出功率P_{om}和效率η各为多少？②晶体管的最大功耗P_{Tmax}为多少？③为了使输出功率达到P_{om}，输入电压的有效值约为多少？

解：① 最大输出功率和效率分别为

$$P_{om}=\frac{(U_{CC}-|U_{CES}|)^2}{2R_L}=24.5\text{W}$$

$$\eta=\frac{\pi}{4}\cdot\frac{U_{CC}-|U_{CES}|}{U_{CC}}\approx 69.8\%$$

② 晶体管的最大功耗为

$$P_{Tmax}\approx 0.2P_{om}=\frac{0.2\times U_{CC}^2}{2R_L}=6.4\text{W}$$

③ 输出功率为P_{om}时的输入电压有效值为

$$U_i\approx U_{om}\approx\frac{U_{CC}-|U_{CES}|}{\sqrt{2}}\approx 9.9\text{V}$$

(3) 在图5.10所示电路中，已知二极管的导通电压$U_D=0.7\text{V}$，晶体管导通时的$|U_{BE}|=0.7\text{V}$，T_2和T_3管发射极静态电位$U_{EQ}=0\text{V}$。

试问：①T_1、T_3和T_5管基极的静态电位各为多少？②设$R_2=10\text{k}\Omega$，$R_3=100\Omega$，若T_1和T_3管基极的静态电流可忽略不计，则T_5管集电极静态电流为多少？静态时$u_i=$？③若静态时$I_{B1}>I_{B3}$，则应调节哪个参数使$I_{B1}=I_{B2}$？如何调节？④电路中二极管的个数可以是1、2、3、4吗？你认为哪个最合适？为什么？

解：① T_1、T_3和T_5管基极的静态电位分别为

$$U_{B1}=1.4\text{V},\ U_{B3}=-0.7\text{V},\ U_{B5}=-17.3\text{V}。$$

② 静态时 T_5 管集电极电流和输入电压为

$$I_{CQ}\approx\frac{U_{CC}-U_{B1}}{R_2}=1.66\text{mA}，u_i\approx u_{B5}=-17.3\text{V}。$$

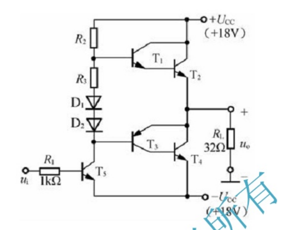


图 5.10　题(3)图

③ 若静态时 $I_{B1}>I_{B3}$，则应增大 R_3。

④ 采用如图 5.10 所示两只二极管加一个小阻值电阻合适，也可只用 3 只二极管。这样一方面可使输出级晶体管工作在临界导通状态，可以消除交越失真；另一方面在交流通路中，D_1 和 D_2 管之间的动态电阻又比较小，可忽略不计，从而可减小交流信号的损失。

(4) 在图 5.10 所示电路中，已知 T_2 和 T_4 管的饱和管压降 $|U_{CES}|=2\text{V}$，静态时电源电流可忽略不计。试问负载上可能获得的最大输出功率 P_{om} 和效率 η 各为多少？

解： 最大输出功率和效率分别为

$$P_{om}=\frac{(U_{CC}-|U_{CES}|)^2}{2R_L}=4\text{W}$$

$$\eta=\frac{\pi}{4}\cdot\frac{U_{CC}-|U_{CES}|}{U_{CC}}\approx 69.8\%$$

5.4　练　习　题

(1) 为了稳定输出电压，减小非线性失真，请通过电阻 R_f 在图 5.10 所示电路中引入合适的负反馈；并估算在电压放大倍数数值约为 10 的情况下，R_f 的取值。

(2) 估算图 5.10 所示电路中的 T_2 和 T_4 管的最大集电极电流、最大管压降和集电极最大功耗。

(3) 在图 5.11 所示电路中，已知 $U_{CC}=15\text{V}$，T_1 和 T_2 管的饱和管压降 $|U_{CES}|=2\text{V}$，输入电压足够大。求解：①最大不失真输出电压的有效值；②负载电阻 R_L 上电流的最大值；③最大输出功率 P_{om} 和效率 η。

(4) 在图 5.11 所示电路中，R_4 和 R_5 可起短路保护作用。试问：当输出因故障而短路时，晶体管的最大集电极电流和功耗各为多少？

(5) 在图 5.12 所示电路中，已知 $U_{CC}=15V$，T_1 和 T_2 管的饱和管压降 $|U_{CES}|=2V$，集成运放的最大输出电压幅值为±13V，二极管的导通电压为 0.7V。

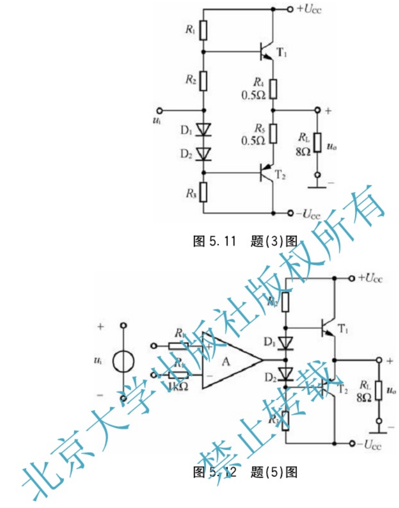


图 5.11　题(3)图

图 5.12　题(5)图

求：

① 若输入电压幅值足够大，则电路的最大输出功率为多少？

② 为了提高输入电阻，稳定输出电压，且减小非线性失真，应引入哪种组态的交流负反馈？画出图来。

③ 若 $U_i=0.1V$ 时，$U_o=5V$，则反馈网络中电阻的取值约为多少？

(6) OTL 电路如图 5.13 所示。

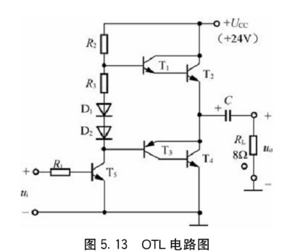


图 5.13　OTL 电路图

① 为了使最大不失真输出电压幅值最大，静态时 T_2 和 T_3 管的发射极电位应为多少？若不合适，则一般应调节哪个元件参数？

② 若 T_2 和 T_4 管的饱和管压降 $|U_{CES}|=3V$，输入电压足够大，则电路的最大输出功率 P_{om} 和效率 η 各为多少？

③ T_2 和 T_4 管的 I_{CM}、$U_{(BR)CEO}$ 和 P_{CM} 应如何选择？

（7）已知图 5.14 所示电路中 T_1 和 T_2 管的饱和管压降 $|U_{CES}|=2V$，导通时的 $|U_{BE}|=0.7V$，输入电压足够大。

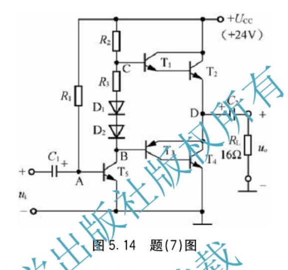


图 5.14　题(7)图

① A、B、C、D 点的静态电位各为多少？

② 为了保证 T_2 和 T_4 管工作在放大状态，管压降 $|U_{CE}|\geqslant 3V$，电路的最大输出功率 P_{om} 和效率 η 各为多少？

（8）图 5.15 所示为两个带自举的功放电路。试分别说明输入信号正半周和负半周时功放管输出回路电流的通路，并指出哪些元件起自举作用。

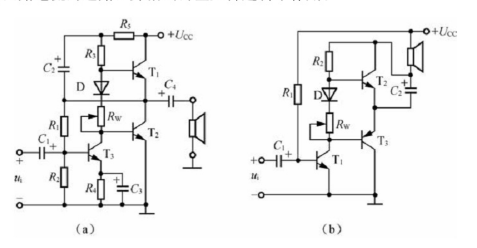


图 5.15　题(8)图

（9）LM1877N－9 为 2 通道低频功率放大电路，单电源供电，最大不失真输出电压的峰-峰值 $U_{OPP}=(U_{CC}-6)V$，开环电压增益为 70dB。图 5.16 所示为 LM1877N－9 中一个通道组成的实用电路，电源电压为 24V，C_1～C_3 对交流信号可视为短路；R_3 和 C_4 起相位

补偿作用，可以认为负载为8Ω。试求：①静态时u_P、u_N、u'_o、u_o各为多少？②设输入电压足够大，电路的最大输出功率P_{om}和效率η各为多少？

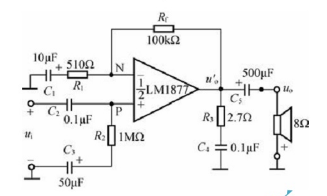


图5.16　题(9)图

(10) 电路如图5.17所示，在出现下列故障时，分别会产生什么现象。①R_1开路；②D_1开路；③R_2开路；④T_1集电极开路；⑤R_1短路；⑥D_1短路。

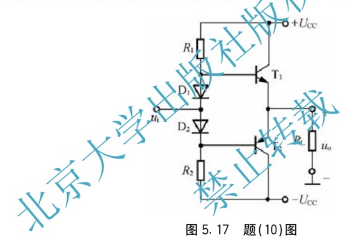


图5.17　题(10)图

(11) 电路如图5.18所示，在出现下列故障时，分别会产生什么现象。①R_2开路；②D_1开路；③R_2短路；④T_1集电极开路；⑤R_3短路。

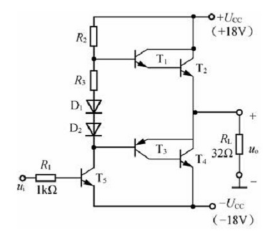


图5.18　题(11)图

练习题答案

(1) 解：应引入电压并联负反馈，由输出端经反馈电阻 R_f 接 T_5 管基极，如图 5.19 所示。

在深度负反馈情况下，电压放大倍数为

$$\dot{A}_{uf} \approx -\frac{R_f}{R_1}，|\dot{A}_{uf}| \approx 10,$$

$R_1 = 1\text{k}\Omega$，所以 $R_f \approx 10\text{k}\Omega$。

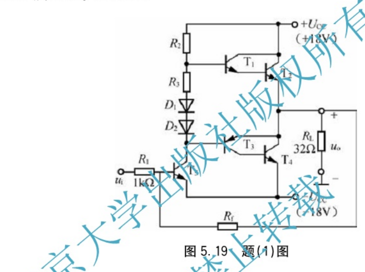


图 5.19 题(1)图

(2) 解：功放管的最大集电极电流、最大管压降、最大功耗分别为

$$I_{Cmax} = \frac{U_{CC} - |U_{CES}|}{R_L} = 0.5\text{A}$$

$$U_{CEmax} = 2U_{CC} - |U_{CES}| = 34\text{V}$$

$$P_{Tmax} \approx 0.2 \times \frac{U_{CC}^2}{2R_L} \approx 1\text{W}$$

(3) 解：①最大不失真输出电压有效值为

$$U_{om} = \frac{\frac{R_L}{R_4 + R_L} \cdot (U_{CC} - U_{CES})}{\sqrt{2}} \approx 8.65\text{V}$$

② 负载电流最大值为

$$i_{Lmax} = \frac{U_{CC} - U_{CES}}{R_4 + R_L} \approx 1.53\text{A}$$

③ 最大输出功率和效率分别为

$$P_{om} = \frac{U_{om}^2}{2R_L} \approx 9.35\text{W}$$

$$\eta=\frac{\pi}{4}\cdot\frac{U_{CC}-U_{CES}-U_{R_4}}{U_{CC}}\approx64\%$$

(4) 解：当输出短路时，功放管的最大集电极电流和功耗分别为

$$i_{Cmax}=\frac{U_{CC}-U_{CES}}{R_4}\approx26\text{A}$$

$$P_{Tmax}=\frac{U_{CC}^2}{\pi^2 R_4}\approx46\text{W}$$

(5) 解：①输出电压幅值和最大输出功率分别为

$$u_{om}\approx13\text{V}$$

$$P_{om}=\frac{(u_{om}/\sqrt{2})^2}{R_L}\approx10.6\text{W}$$

② 应引入电压串联负反馈，电路如图 5.20 所示。

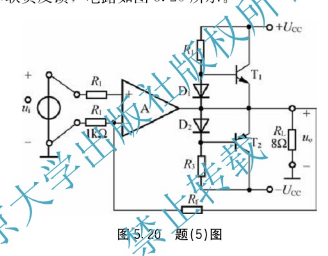


图 5.20 题(5)图

③ 在深度负反馈条件下，电压放大倍数为

$$A_u=\frac{\dot{u}_o}{\dot{u}_i}\approx1+\frac{R_f}{R_1},\ A_u=\frac{\dot{u}_o}{\dot{u}_i}=50,$$

$R_1=1\text{k}\Omega$，所以 $R_f\approx49\text{k}\Omega$。

(6) 解：①射极电位 $U_E=U_{CC}/2=12\text{V}$；若不合适，则应调节 R_2。

② 最大输出功率和效率分别为

$$P_{om}=\frac{\left(\frac{1}{2}\cdot U_{CC}-|U_{CES}|\right)^2}{2R_L}\approx5.06\text{W}$$

$$\eta=\frac{\pi}{4}\cdot\frac{\frac{1}{2}\cdot U_{CC}-|U_{CES}|}{\frac{1}{2}\cdot U_{CC}}\approx58.9\%$$

③ T_2 和 T_4 管 I_{CM}、$U_{(BR)CEO}$ 和 P_{CM} 的选择原则分别为

$$I_{CM}>\frac{U_{CC}/2}{R_L}=1.5\text{A}$$



$$U_{(BR)CEO} > U_{CC} = 24V$$

$$P_{CM} > \frac{(U_{CC}/2)^2}{\pi^2 R_L} \approx 1.82W$$

(7) 解：①静态电位分别为

$U_A = 0.7V$，$U_B = 9.3V$，$U_C = 11.4V$，$U_D = 10V$。

② 最大输出功率和效率分别为

$$P_{om} = \frac{\left(\frac{1}{2} \cdot U_{CC} - |U_{CES}|\right)^2}{2R_L} \approx 1.53W$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot U_{CC} - |U_{CES}|}{\frac{1}{2} \cdot U_{CC}} \approx 55\%$$

(8) 解：在图 5.15(a)所示电路中，在信号的正半周，经共射电路反相，输出级的输入为负半周，因而 T_2导通，电流从 C_4的正端经 T_2、地、扬声器至 C_4的负端；在信号的负半周，经共射电路反相，输出级的输入为正半周，因而 T_1导通，电流从$+U_{CC}$经 T_2、C_4、扬声器至地。C_2、R_3起自举作用。

在图 5.15(b)所示电路中，在信号的正半周，经共射电路反相，输出级的输入为负半周，因而 T_3导通，电流从$+U_{CC}$经扬声器、C_2、T_3至地；在信号的负半周，经共射电路反相，输出级的输入为正半周，因而 T_2导通，电流从 C_4的正端经扬声器、T_2至 C_4的负端。C_2、R_2起自举作用。

(9) 解：①静态时

$$u_o' = u_P = u_N = \frac{U_{CC}}{2} = 12V，u_o = 0V。$$

② 最大输出功率和效率分别为

$$P_{om} = \frac{\left(\frac{U_{CC} - 6}{2}\right)^2}{2R_L} \approx 5.06W$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{U_{CC} - 6}{U_{CC}} \approx 58.9\%$$

(10) 解：①仅有负半周；②T_1、T_2将因功耗过大而损坏；③仅有正半周；④T_2将因功耗过大而损坏；⑤$u_o = U_{CC} - U_{BE1} \approx 14.3V$；⑥略有交越失真。

(11) 解：① 无输出。

② 功放管将因功耗过大而损坏。

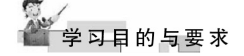
③ $u_o = U_{CC} - U_{BE1} - U_{BE2} \approx 16.6V$。

④ 正、负半周不对称，正半周幅值小。

⑤ 略有交越失真。

第6章

集成运算放大器



学习目的与要求

(1) 熟悉集成运算放大电路的组成及各部分的作用。

(2) 了解电流源电路的工作原理。

(3) 理解集成运算放大电路的主要性能指标。

(4) 掌握差分放大电路的工作原理，以及长尾式和恒流源差分放大电路对零点漂移的抑制作用。

(5) 理解差模信号、共模信号、信号分解及共模抑制比的概念。

(6) 掌握差分放大电路的输入输出方式及差模增益、共模增益、输入电阻和输出电阻的计算。



知识架构

- 差分放大电路
  - 双端输出的基本差分放大电路
  - 单端输出的差分放大电路
- 恒流源
  - 差分放大电路中恒流源的作用
  - 集成运算放大器中的恒流源
- 集成运算放大器
  - 集成运算放大器的基本结构及其特点
  - 集成运算放大器一些特殊参数含义



难点

(1) 差动放大电路静态及动态分析计算，共模抑制比的求取。

(2) 输入输出方式与相位的关系。

(3) 差分放大器抑制共模信号、放大差模信号的原理。



(1) 运算放大电路的组成，电流源的工作原理。

(2) 差分放大电路的工作原理，差分放大电路的输入输出形式，差分放大电路的分析，共模抑制比的概念及其提高。

(3) 运算放大电路的主要性能指标、特殊运放及其特点。

(4) 运算放大电路分别工作在线性状态和非线性状态时的特点。

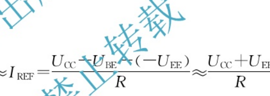
6.1　知识要点

6.1.1　模拟集成电路中的直流偏置技术

1. BJT 电流源电路

1) 镜像电流源

镜像电流源如图 6.1 所示。



$$I_O = I_{C2} = I_{C1} \approx I_{REF} = \frac{U_{CC} - U_{BE} - (-U_{EE})}{R} \approx \frac{U_{CC} + U_{EE}}{R}$$

(1) T_1、T_2 的特性相同，T_1 对 T_2 有很好的温度补偿作用，且要求电源十分稳定。

(2) 镜像电流源电路适用于有较大工作电流(毫安数量级)的场合。

2) 微电流源

微电流源如图 6.2 所示。

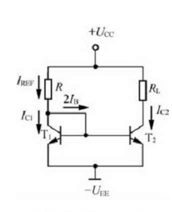


图 6.1　镜像电流源

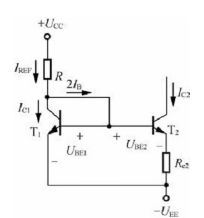


图 6.2　微电流源

$$I_O = I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{U_{BE1} - U_{BE2}}{R_{e2}} = \frac{\Delta U_{BE}}{R_{e2}}$$



该电路可获得微小的工作电流。一般 $U_{BE2}<U_{BE1}$，T_2工作在输入特性曲线的弯曲部分，I_{C2}变化远小于 I_{REF}变化，电源波动对 I_{C2}影响小。

3）电流源用作有源负载

电流源用作有源负载如图 6.3 所示。

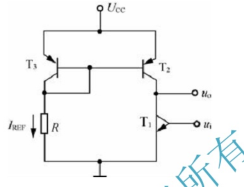
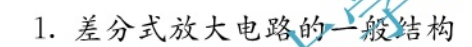


图 6.3　电流源用作有源负载

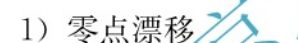
（1）由有源器件及其电路作为放大电路的负载称为有源负载。

（2）电流源交流电阻大，有源负载大大提高了共射放大电路的电压增益。

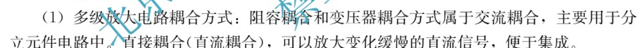
6.1.2　差分式放大电路



1. 差分式放大电路的一般结构



1）零点漂移



（1）多级放大电路耦合方式：阻容耦合和变压器耦合方式属于交流耦合，主要用于分立元件电路中。直接耦合(直流耦合)，可以放大变化缓慢的直流信号，便于集成。

（2）零点漂移(零漂)：将直接耦合放大电路的输入端短路，静态输出电压会随着时间缓慢地随机波动。零漂实际上是静态工作点的漂移，其产生的主要原因是温度的变化、电源电压波动。通常将输出端漂移电压除以放大电路电压增益，折算为输入端等效输入漂移电压，作为零漂衡量指标。这样前级的零点漂移被后级电路逐级放大，并最终形成一个较大的电压漂移。第一级的漂移对放大电路的总漂移起决定作用。

（3）抑制零点漂移一般可以采取以下 3 种措施。

① 用非线性元件进行温度补偿。

② 采用调制解调方式，如斩波稳零放大器。

③ 采用差分式放大电路。

2）差模信号和共模信号

放大电路是一个双口网络，有两个输入端和输出端。当两个输入端分别输入信号 u_{i1} 和 u_{i2}时，差模信号 $u_{id}=u_{i1}-u_{i2}$，共模信号 $u_{ic}=\frac{u_{i1}+u_{i2}}{2}$。

（1）共模分量大小相等，相位相同；差模分量大小相等，相位相反。





（2）两个输入端的信号均可分解为差模信号和共模信号两部分。即

$$u_{i1}=u_{ic}+\frac{u_{id}}{2}$$

$$u_{i2}=u_{ic}-\frac{u_{id}}{2}$$

（3）u_{od}表示由差模信号产生的输出，u_{oc}表示由共模信号产生的输出，差模增益 $A_{ud}=\frac{u_{od}}{u_{id}}$，共模增益 $A_{uc}=\frac{u_{oc}}{u_{ic}}$。放大电路总的输出电压 $u_o=A_{ud}u_{id}+A_{uc}u_{ic}$。

（4）共模抑制比 $K_{CMR}=\left|\frac{A_{ud}}{A_{uc}}\right|$ 或 $K_{CMR}=20\lg\left|\frac{A_{ud}}{A_{uc}}\right|$ dB，其差分放大电路可反映抑制零点漂移的能力。

2. 射极耦合差分式放大电路

1）基本电路

射极耦合差分式放大电路如图 6.4 所示。

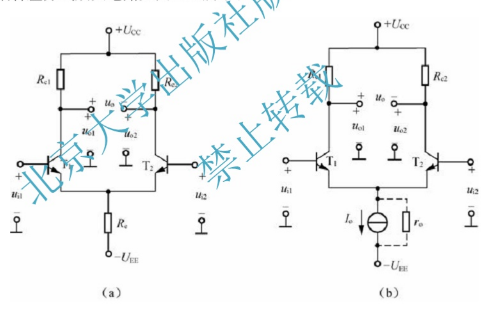


图 6.4　射极耦合差分式放大电路

基本差分式放大电路可以看作是两个完全对称的共发射极放大电路，将 R_e 换成电流源，可以大大提高共模抑制比。

射极耦合差方式放大电路有 4 种工作方式：双端输入、双端输出；双端输入、单端输出；单端输入、双端输出；单端输入、单端输出。

2）工作原理

（1）静态分析。当输入信号为零，即 $u_{i1}=u_{i2}=0$ 时，电路处于直流工作状态。

① 由于 $0-U_{BE}-2I_ER_e-(-U_{EE})=0$，从而可推导得到 I_E。

$$U_{CE}=U_C-U_E=(U_{CC}-I_CR_C)-(0-U_{BE})=U_{CC}-I_CR_C+U_{BE}$$



② $I_E=\frac{I_o}{2}$，$U_{CE}=U_C-U_E=(U_{CC}-I_CR_C)-(0-U_{BE})=U_{CC}-I_CR_C+U_{BE}$。

(2) 动态分析。抑制零漂的原理：温度变化或电源电压波动(相当于在两个输入端加入共模信号)，会引起两管集电极电流及集电极电压相同的变化，在电路完全对称的情况下，双端输出(两集电极间)的电压可以始终保持为零(图 6.5)。

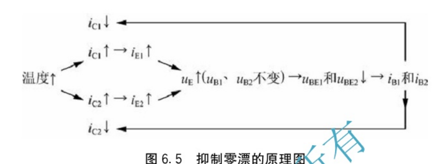


图 6.5　抑制零漂的原理图

类似于分压式射极偏置电路的温度稳定过程，即使电路处于单端输出方式，其仍有较强的抑制零漂能力。

3) 主要技术指标计算

(1) 差模电压增益。

① 双端输入、双端输出。

双端输入差模信号时，$u_{i1}=-u_{i2}=\frac{u_{id}}{2}$。



T_1 和 T_2 发射极电流的变化大小相等、方向相反，流过 R_e 的电流不变，发射极电位不变，对于交流信号来说即等效于 $u_e=0$。

当双端输出带负载时，负载电阻两端电位的变化大小相等、方向相反，中点电位不变，相当于交流接地。对于单边来说，负载的大小等于 $R_L/2$。交流通路左右各相当于一个单管共射极放大电路。

此时的电压增益为

$$A_{ud}=\frac{u_o}{u_{id}}=\frac{u_{o1}-u_{o2}}{u_{i1}-u_{i2}}=\frac{2u_{o1}}{2u_{i1}}=-\frac{\beta\left(R_c\parallel\frac{R_L}{2}\right)}{r_{be}}$$

与单管共射极放大电路的电压增益相同。

② 双端输入、单端输出的差模电压增益。单端输出时，输出电压取自 u_{o1} 或 u_{o2}。

u_{o1}输出时，差模电压增益为

$$A_{ud1}=\frac{u_{o1}}{u_{id}}=-\frac{\beta(R_c\parallel R_L)}{2r_{be}}$$

③ 单端输入的差模电压增益。图 6.6 所示为单端输入的差模电压增益。

$u_e\neq0$。在只考虑差模输入信号时，差模电压增益表达式与双端输入近似一样。

(2) 差模输入电阻和输出电阻。对于双端输入差模信号的差分电路，差模输入电阻为

$$R_{id}=\frac{u_{id}}{i_{id}}=\frac{2u_{i1}}{i_{b1}}=2r_{be}$$





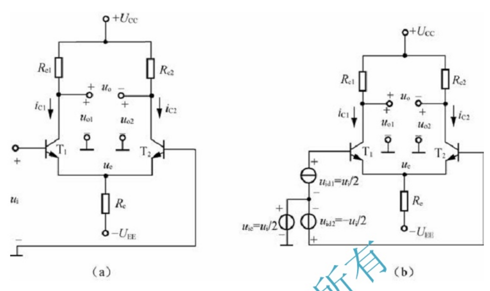


图 6.6　单端输入的差模电压增益

单端输入时与双端输入一样，其差模输入电阻也与双端输入相同。

双端输出时：$R_o=2R_c$。

单端输出时：$R_o=R_c$。

(3) 共模电压增益及共模抑制比，共模动态指标计算电路如图 6.7 所示。

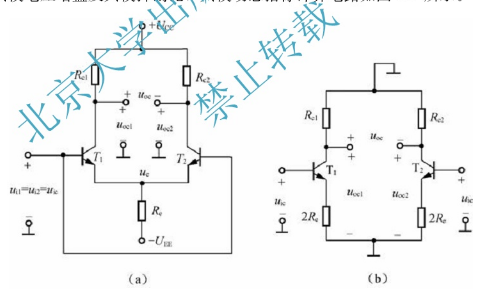


图 6.7　共模动态指标计算

在共模信号作用下，两管射极电流的变化相同，发射极的交流电位 $u_e=2i_eR_e$，对每管而言，相当于射极接了 $2R_e$ 的电阻。

双端输出时，$A_{uc}=\dfrac{u_{oc}}{u_{ic}}=\dfrac{u_{oc1}-u_{oc2}}{u_{ic}}=0$。

单端输出时，$A_{uc}=\dfrac{u_{oc1}}{u_{ic}}=\dfrac{u_{oc2}}{u_{ic}}=-\dfrac{\beta(R_c\parallel R_L)}{r_{be}+(1+\beta)2R_e}\approx-\dfrac{R_c\parallel R_L}{2R_e}$。

将 R_e 换成电流源后，共模电压增益将减小很多，也会大大提高抑制共模信号的能力。



共模输入电阻为

$$R_{ic}=\frac{u_{ic}}{i_{ic}}=\frac{u_{ic}}{2i_{b1}}=\frac{1}{2}\ [r_{be}+(1+\beta)2R_e]$$

双端输出时，共模增益 $A_{oc}=0$，所以 $K_{CMR}=\infty$。

单端输出时，$K_{CMR}=\frac{\beta R_e}{r_{be}}$。

6.1.3 集成电路运算放大器

集成电路运算放大器是一种高电压增益、高输入电阻和低输出电阻的多级直接耦合放大电路，内部电路组成框图如图 6.8 所示。

(1) 输入级：差分式放大电路，利用对称性提高整个电路的共模抑制比。两个输入端构成整个电路的反相输入端和同相输入端。

(2) 电压放大级：提高电压增益，由一级或多级放大电路组成。

(3) 输出级：由互补对称功率放大电路组成，以降低输出电阻，提高带负载能力。

(4) 偏置电路：为各级提供合适的偏置电流。

(5) 辅助环节：电平移动电路、过载保护电路以及高频补偿环节等。

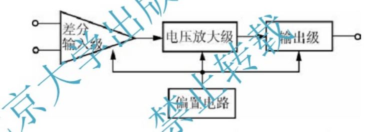


图 6.8 集成电路运算放大器内部电路组成原理框图

1. 集成运放主要参数

1) 输入直流误差特性

(1) 输入失调电压 U_{IO}：为使输出电压为零在输入端加的补偿电压，反映运放输入级的对称失配程度。

(2) 输入偏置电流 I_{IB}：输入差分对管基极(栅极)偏置电流，$I_{IB}=(I_{BP}+I_{BN})/2$。

(3) 输入失调电流 I_{IO}：反映差分对管输入电流不对称程度的参数，$I_{IO}=|I_{BP}-I_{BN}|$。

2) 差模特性

(1) 开环差模电压增益 A_{uo}：无反馈情况下。

(2) 差模输入电阻 r_{id}和输出电阻 r_o。

(3) 最大差模输入电压 U_{idmax}。

3) 共模特性

(1) 共模抑制比 K_{CMR}和共模输入电阻 r_{ic}。

(2) 最大共模输入电压 U_{icmax}。





4）大信号动态特性

转换速率 S_R：放大电路闭环状态下，输入大信号时输出电压的最大变化速率，$S_R = \left.\frac{du_o(t)}{dt}\right|_{max}$。

2. 集成运放应用中的实际问题

（1）运放种类：高精度、高速、低功耗、宽带、低噪声、低漂移、高输入阻抗。

（2）消除输入偏置电流引起的输入误差电压：$R_p = R_n$。

（3）消除输入失调电压、输入失调电流：调零电路。

6.2　典型例题分析

例题 1：电路如图 6.9 所示，用镜像电流源对射极跟随器进行偏置。设 $\beta \gg 1$，求电流的值。若 $r_o(r_{ce}) = 100\text{k}\Omega$，试比较该电路与分立元件电路的优点。设 $U_{CC} = U_{EE} = 10\text{V}$，$U_{BE} = 0.6\text{V}$。

解：（1）T_1、T_2组成镜像电流源电路，为 T_3提供发射极电流，即进行偏置，电路中 $\beta \gg 1$，故电路中的电流 I_o为

$$I_o \approx I_{REF} = \frac{U_{CC} - U_{BE} - (-U_{EE})}{R} = 19.4\text{mA}$$

（2）该电路是由（T_1、T_2）电流源电路输出电阻（$r_o = r_{ce}$）代替射极输出器 T_3的射极电阻 R_{e3}，该电路的输入电阻和输出电阻为

$$R_i = r_{be3} + (1+\beta) r_o$$

$$R_o = \frac{r_{be}}{1+\beta}$$

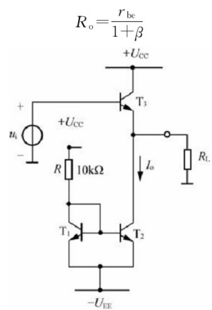


图 6.9　例题 1 图

与分立元件电路相比，输入电阻更大，输出电阻小，它的集电极电流 i_{e3} 更多地流向负载，提高了射极输出器的带负载能力。

例题 2：在图 6.10 所示的放大电路中，$U_{CC}=10V$，$-U_{EE}=-10V$，$I_o=1mA$，$r_o=25k\Omega$(电路中未画出)，$R_{c1}=R_{c2}=10k\Omega$，BJT 的 $\beta=200$，$U_{BE}=0.7V$；①当 $u_{i1}=u_{i2}=0$ 时，求 I_C、U_E、U_{CE1} 和 U_{CE2}；②当 $u_{i1}=-u_{i2}=u_{id}/2$ 时，求双端输出时的 A_{ud} 和单端输出时的 A_{ud1}、A_{uc} 和 K_{CMR} 的值。

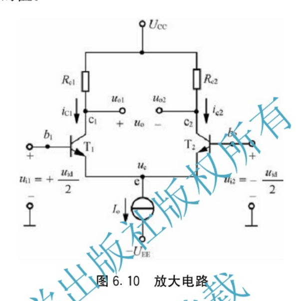


图 6.10　放大电路

解：(1)当 $u_{i1}=u_{i2}=0$ 时，为电路静态，据直流通路得 $I_{C1}=I_{C2}=\dfrac{I_o}{2}=0.5mA$，

$U_E=-U_{BE}$，$U_{CE1}=U_{CE2}=U_{CC}-I_{C1}R_{C1}-U_E=5.7V$。

(2) 当 $u_{i1}=-u_{i2}=u_{id}/2$ 时，电路为差模输入，画出交流通路，将 FET 替换为小信号模型。

① 双端输出时，得差模电压增益为

$$A_{ud}=\frac{u_o}{u_{id}}=\frac{u_{o1}-u_{o2}}{u_{i1}-u_{i2}}=\frac{2u_{o1}}{2u_{i1}}=\frac{u_{o1}}{u_{i1}}=\frac{-\beta R_{c1}}{r_{be1}}=-186.9$$

式中：$r_{be1}=10.7k\Omega$。

② 单端输出时，得差模增益和共模增益以及共模抑制比分别为

$$A_{ud1}=\frac{u_o}{u_{id}}=\frac{u_o}{u_{i1}-u_{i2}}=\frac{u_o}{2u_{i1}}=\frac{-\beta R_{c1}}{2r_{be1}}=-93.5$$

$$A_{uc}=\frac{u_o}{u_{ic}}=\frac{u_{c1}}{u_{i1}}=\frac{-\beta R_{c1}}{r_{be1}+2(1+\beta)r_o}\approx\frac{-R_{c1}}{2r_o}=-0.2$$

$$K_{CMR1}=\left|\frac{A_{ud}}{A_{uc}}\right|=467.25$$

例题 3：电路如图 6.11 所示，已知 BJT 的 $\beta_1=\beta_2=\beta_3=50$，$r_{ce}=200k\Omega$，$U_{BE}=0.7V$，试求单端输出时的差模电压增益 A_{ud2}、共模抑制比 K_{CMR}、差模输入电阻 R_{id} 和输出电阻 R_o。提示：AB 两端的交流电阻为



$$r_{AB}=r_{o}=r_{ce3}\left[1+\frac{\beta_3 R_{e3}}{r_{be3}+(R_1 \parallel R_2)+R_{e3}}\right]。$$

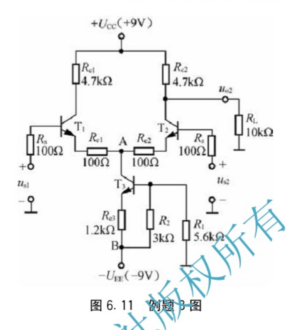


图 6.11 例题 3 图

解： 1）静态分析

计算电流源 I_3 输出电流，并确定 T_1、T_2 的静态电流。

R_2 两端的电压为

$$U_{R2}\approx\frac{R_2}{R_1+R_2}U_{EE}=\frac{3}{3+5.6}(+9)=+3.1\text{V}$$

电流源 I_3 的输出电流为

$$I_{o3}\approx\frac{U_{R2}-U_{BE3}}{R_{e3}}=\frac{3.1-0.7}{1.2\times10^3}\text{A}=2\text{mA}$$

T_1、T_2 的静态电流为

$$I_{o1}=I_{o2}=\frac{1}{2}I_{o3}=1\text{mA}$$

BJT 小信号模型参数为

$$r_{be1}=r_{be2}=200\Omega+(1+\beta_1)\frac{U_T}{I_{E1}}=1.53\text{k}\Omega$$

$$r_{be3}=\left[200\Omega+(1+\beta_3)\frac{U_T}{I_{E3}}\right]=0.86\text{k}\Omega$$

$$R_1 \parallel R_2=1.95\text{k}\Omega$$

2）交流分析

（1）单端输出差模电压增益为

$$A_{ud2}=\frac{u_o}{u_{sd}}=\frac{u_{o2}}{u_{s1}-u_{s2}}=\frac{u_{c2}}{2u_{i1}}=\frac{\beta(R_{c2}/\!/R_L)}{2\left[R_s+r_{be1}+(1+\beta)R_{e1}\right]}=12$$

AB 两端交流电阻为

$$r_{AB}=r_o=r_{ce3}\left(1+\frac{\beta_3 R_{e3}}{r_{be3}+R_1\parallel R_2+R_{e3}}\right)=200\left[1+\frac{50\times1.2}{0.86+1.95+1.2}\right]\text{k}\Omega=3.2\text{M}\Omega$$

（2）单端输出的共模电压增益为

$$A_{uc2}=\frac{u_o}{u_{sc}}=\frac{u_o}{u_{s1}}=\frac{u_{o2}}{u_{s1}}=\frac{-\beta(R_{c2}/\!/R_L)}{R_s+r_{be1}+(1+\beta)(R_{e1}+2r_o)}\approx\frac{-\beta(R_{c2}/\!/R_L)}{2(1+\beta)r_o}=-0.0005$$

（3）共模抑制比为

$$K_{CMR}=\left|\frac{A_{ud2}}{A_{uc2}}\right|=\frac{12}{0.0005}=24000$$

（4）差模输入电阻和输出电阻分别为

$$R_{id}=2\left[R_s+r_{be1}+(1+\beta)R_{e1}\right]=2\left[0.1+1.53+51\times0.1\right]\text{k}\Omega=13.5\text{k}\Omega$$

$$R_o=R_{c2}=4.7\text{k}\Omega$$

例题 4：在图 6.12 所示的电路中，电流表的满偏电流 I_M 为 100μA，电表支路电阻 R_m 为 2kΩ，两管的 $\beta=50$，$U_{BE}=0.7$V，$r_{bb'}=300\Omega$，试计算：①当 $u_{s1}=u_{s2}=0$ 时，每管的静态工作点；②为了使电流表指针满偏，需要加多大的输入电压？

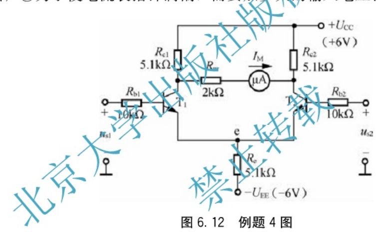


图 6.12　例题 4 图

解：（1）当 $u_{s1}=u_{s2}=0$ 时，电路为静态，据直流通路得 BJT 静态工作点为

$$U_{EE}=R_{b1}\frac{I_{E1}}{1+\beta}+U_{BE}+2I_{E1}R_e$$

$$I_{C1}\approx I_{E1}=\frac{U_{EE}-U_{BE}}{\dfrac{R_{b1}}{1+\beta}+2R_e}\approx\frac{U_{EE}-U_{BE}}{2R_e}=0.52\text{mA}$$

$$I_{B1}=I_{B2}=I_{C1}/\beta=10\mu\text{A}$$

$$U_{CE1}=U_{CE2}=U_{CC}-I_{C1}R_{C1}-U_E=4\text{V}$$

（2）电流表指针满偏时的输出电压 $u_o=I_M R_m=0.2$V。

画出其交流通路，如图 6.13 所示。

① 双端输出的差模电压放大倍数为

$$A_{ud}=\frac{u_o}{u_{sd}}=\frac{u_{o1}-u_{o2}}{u_{s1}-u_{s2}}=\frac{2u_{o1}}{2u_{s1}}=\frac{u_{o1}}{u_{s1}}=\frac{-\beta\left(R_c/\!/\dfrac{R_m}{2}\right)}{R_{b1}+r_{be1}}=-3.25$$



② 电表满偏时的输入电压为

$$u_{id}=-\frac{u_o}{A_{ud}}=0.062\text{V}$$

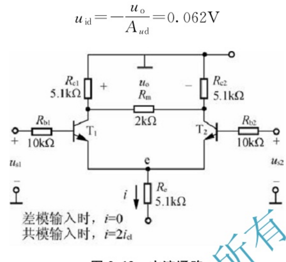


图 6.13　交流通路

例题 5：BiFET 型运放 LH0042 简化原理电路图如图 6.14 所示，试说明电路的基本组成和工作原理。

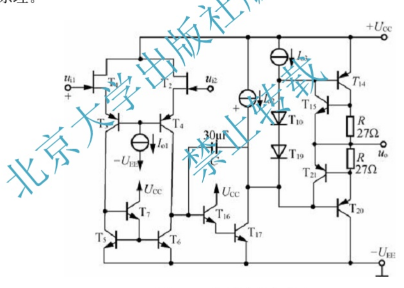


图 6.14　简化原理电路图

答：电路由 3 部分组成，各部分工作原理如下所述。

输入级：由 T_1 到 T_7 组成，其中(T_1、T_3)或(T_2、T_4)为共漏-共基组合放大电路，又对称构成单端输出(T_4集电极输出)的差分放大电路。T_5、T_6、T_7 构成电流源电路，为差分放大电路提供静态工作电流，同时也是有源电阻，可提高输入级的电压增益并提高输入电阻。

中间级：T_{16}、T_{17} 为共集共射组合放大电路。

输出级：T_{14}、T_{20} 为甲乙类功率放大电路。T_{15}、T_{21} 是输出过流保护电路。两个二极管 T_{10}、T_{19}(实际上是三极管)为功率管提供小的偏置电压，以克服交越失真，改善输出波形。

6.3 自 测 题

自测题一：判断下列说法是否正确。

(1) 运放的输入失调电压U_{io}是两输入端电位之差。 ( )

(2) 运放的输入失调电流I_{io}是两输入端电流之差。 ( )

(3) 运放的共模抑制比$K_{CMR}=\left|\dfrac{A_{ud}}{A_{uc}}\right|$ ( )

(4) 有源负载可以增大放大电路的输出电流。 ( )

(5) 在输入信号作用时，偏置电路改变了各放大管的动态电流。 ( )

解：(1) × (2) √ (3) √ (4) √ (5) ×

自测题二：选择正确答案填入空内。

(1) 集成运放电路采用直接耦合方式是因为________。

A. 可获得很大的放大倍数

B. 可使温漂小

C. 集成工艺难于制造大容量电容

(2) 通用型集成运放适用于放大________。

A. 高频信号 B. 低频信号 C. 任何频率信号

(3) 集成运放制造工艺使得同类半导体管的________。

A. 指标参数准确 B. 参数不受温度影响 C. 参数一致性好

(4) 集成运放的输入级采用差分放大电路是因为可以________。

A. 减小温漂 B. 增大放大倍数 C. 提高输入电阻

(5) 为增大电压放大倍数，集成运放的中间级多采用________。

A. 共射放大电路 B. 共集放大电路 C. 共基放大电路

解：(1) C (2) B (3) C (4) A (5) A

自测题三：分析计算题。

(1) 电路如图6.15所示，已知$\beta_1=\beta_2=\beta_3=100$，各管的$U_{BE}$均为0.7V，试求$I_{C2}$的值。

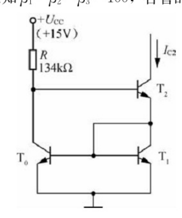


图6.15 题(1)图



解： 分析估算如下：

$$I_{R}=\frac{U_{CC}-U_{BE2}-U_{BE1}}{R}=100\mu A$$

$$I_{C0}=I_{C1}=I_{C}$$

$$I_{C2}=I_{E2}=I_{C1}$$

$$I_{R}=I_{C0}+I_{B2}=I_{C1}+I_{B1}=I_{C2}+\frac{I_{C2}}{\beta}$$

$$I_{C2}=\frac{\beta}{1+\beta}\cdot I_{R}\approx I_{R}=100\mu A$$

(2) 电路如图 6.16 所示。

① 说明电路是几级放大电路，各级分别是哪种形式的放大电路(共射、共集、差放、……)。

② 分别说明各级采用了哪些措施来改善其性能指标(如增大放大倍数、输入电阻、……)。

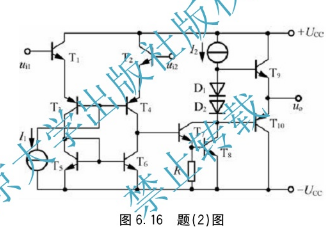


图 6.16　题(2)图

解： ① 三级放大电路，第一级为共集-共基双端输入、单端输出差分放大电路，第二级是共射放大电路，第三级是互补输出级。

② 第一级采用共集-共基形式，增大输入电阻，改善高频特性，利用有源负载(T_5、T_6)增大差模放大倍数，使单端输出电路的差模放大倍数近似等于双端输出电路的差模放大倍数，同时减小共模放大倍数。

第二级为共射放大电路，以 T_7、T_8 构成的复合管为放大管，以恒流源作集电极负载，增大放大倍数。

第三级为互补输出级，加了偏置电路，利用 D_1、D_2 的导通压降使 T_9 和 T_{10} 在静态时处于临界导通状态，从而消除交越失真。

(3) 根据下列要求，将应优先考虑使用的集成运放填入空内。已知现有集成运放的类型是 A 通用型、B 高阻型、C 高速型、D 低功耗型、E 高压型、F 大功率型、G 高精度型。

① 作低频放大器，应选用________。

② 作宽频带放大器，应选用________。

③ 作幅值为 1μV 以下微弱信号的量测放大器，应选用________。



④ 作内阻为 100kΩ 信号源的放大器，应选用________。

⑤ 负载需 5A 电流驱动的放大器，应选用________。

⑥ 要求输出电压幅值为±80V 的放大器，应选用________。

⑦ 宇航仪器中所用的放大器，应选用________。

解： ①A　②C　③G　④B　⑤F　⑥E　⑦D

(4) 差动放大电路如图 6.17 所示，R_W 起到调电路两边对称程度的作用。已知：$U_{CC}=U_{EE}=12V$，$R_b=R_c=R_e=10k\Omega$，$R_W=200\Omega$，滑动头位于其中点，$U_{BE}=0.7V$，$\beta_1=\beta_2=50$，$r_{be}=2.5k\Omega$。

① 估算电路的静态工作点 I_{B1Q}、I_{C1Q}和 U_{CE1Q}。

② 求电路的 A_{ud}。

③ 计算电路的差模输入电阻 R_{id}和差模输出电阻 R_{od}。

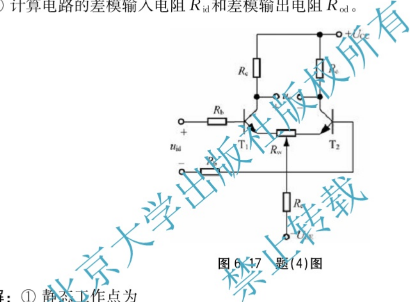


图 6.17　题(4)图

解： ① 静态工作点为

$$I_{B1}R_b+U_{BE}+\frac{1}{2}I_{E1}R_W+2I_{E1}R_e=U_{EE}$$

$$\therefore I_{B1}=11\mu A$$

$$I_{E1}=I_{C1}=0.55mA$$

$$U_{CE}=U_{CC}+U_{EE}-I_{C1}R_c-\frac{1}{2}I_{E1}R_W-2I_{E1}R_e=7.5V$$

② $A_{ud}=-\dfrac{i_cR_c}{i_b(R_b+r_{be}+0.5(1+\beta)R_W)}=-28.5$

③ $R_{id}=35k\Omega$

$R_{od}=20k\Omega$

(5) 电路如图 6.18 所示，各晶体管的 β 均为 80，$U_{BE}=0.6V$，$r_{bb'}=330\Omega$，基极电流均可忽略，R_w 滑动端处于中间位置，试求：①T_3 的静态工作点；②电压放大倍数 $A_u=\dfrac{\dot{u}_o}{\dot{u}_i}$；③输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o；④不失真的最大输入信号 U_{im}为多少(设 T_3的 $U_{CES3}=1V$)？





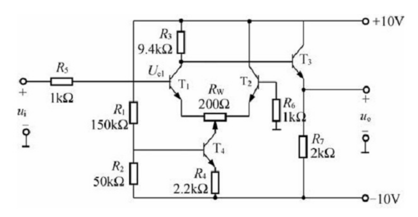


图 6.18 题(5)图

解：① 忽略各晶体管的基极电流，可近似计算如下：

$$U_{R_2}=\frac{10-(-10)}{R_1+R_2}\times R_2=\frac{20}{200}\times 50=5\text{V},\ I_{E4Q}=\frac{U_{R_2}-U_{BE4}}{R_4}=\frac{5-0.6}{2.2}=2\text{mA},$$

$$I_{E1Q}=I_{E2Q}=\frac{1}{2}I_{C4Q}\approx\frac{1}{2}I_{E4Q}=1\text{mA},\ I_{C1Q}\approx I_{E1Q}\approx 1\text{mA},$$

$$U_{C1Q}=10-R_3I_{C1Q}=10-9.4\times 1=0.6\text{V},\ U_{E3Q}=U_O=U_{C1Q}-U_{BE}=0\text{V},$$

$$I_{E3Q}=\frac{U_{E3Q}-(-10)}{R_7}=5\text{mA},\ I_{C3Q}\approx I_{E3Q}=5\text{mA},\ U_{CE3Q}=10-U_{E3Q}=10\text{V}。$$

② $r_{be1}=300+(1+\beta)\dfrac{26}{I_{E1Q}}=300+81\times\dfrac{26}{1}\approx 2.4\text{k}\Omega$

$$r_{be3}=300+(1+\beta)\frac{26}{I_{E3Q}}=300+81\times\frac{26}{5}\approx 0.72\text{k}\Omega$$

$$R_{i3}=r_{be3}+(1+\beta)R_7=0.72+81\times 2=162.72\text{k}\Omega$$

$$R'_{L1}=R_3//R_{i3}=9.4//162.72\approx 8.89\text{k}\Omega$$

$$A_{u1}=-\frac{1}{2}\frac{\beta R'_{L1}}{R_5+r_{be1}+(1+\beta)\times\frac{1}{2}R_W}=-\frac{1}{2}\frac{81\times 8.89}{1+2.4+81\times 0.5\times 0.2}\approx -31.3$$

$$A_{u2}=\frac{(1+\beta)R_7}{r_{be3}+(1+\beta)R_7}=\frac{81\times 2}{162.72}\approx 0.996$$

$$A_u=A_{u1}\cdot A_{u2}\approx -31.3\times 0.9956\approx -31.6$$

③ $R_i=2\left[R_5+r_{be1}+(1+\beta)\dfrac{1}{2}R_W\right]=2\left[1+2.4+81\times 0.1\right]=23\text{k}\Omega$

$$R_o=\frac{R_3+r_{be3}}{1+\beta}//R_7=\frac{9.4+0.72}{81}//2\approx 118\Omega$$

④ $U_{om}=10-U_{CES3}=10-1=9\text{V}$

$$U_{im}=\frac{U_{om}}{|A_u|}\approx 289\text{mV}$$

(6) 带恒流源的差动放大电路如图 6.19 所示。$U_{CC}=U_{EE}=12\text{V}$，$R_C=5\text{k}\Omega$，$R_b=$



1kΩ，$R_e=3.6\text{k}\Omega$，$R=3\text{k}\Omega$，$\beta_1=\beta_2=50$，$R_L=10\text{k}\Omega$，$r_{be1}=r_{be2}=1.5\text{k}\Omega$，$U_{BE1}=U_{BE2}=0.7\text{V}$，$U_Z=8\text{V}$。①估算电路的静态工作点$I_{C1Q}$、$U_{C1Q}$、$I_{C2Q}$和$U_{C2Q}$；②计算差模放大倍数$A_{ud}$；③计算差模输入电阻$R_{id}$和差模输出电阻$R_{od}$。

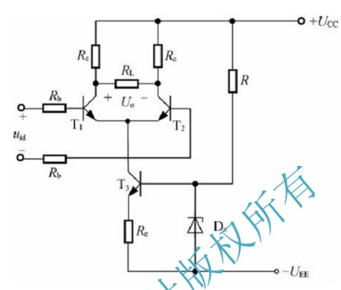


图 6.19　带恒流源的差动放大电路图

解：①电流源的电流 $I_{CQ}=I_{EQ}=\dfrac{U_Z-0.7}{R_e}=2\text{mA}$，即 $I_{E1Q}=I_{E2Q}=\dfrac{1}{2}I_{CQ}=1\text{mA}$，

$\therefore I_{C1Q}=I_{C2Q}=1\text{mA}$，$U_{C1Q}=U_{C2Q}=U_{CC}-I_{CQ}R_C=12-5\times1=7\text{V}$

② $A_{ud}=-50$。

③ $R_{id}=5\Omega$，$R_{od}=10\Omega$。

（7）为什么说集成运放的输入偏置电流I_{IB}越小越好？为了减小输入偏置电流，通常可采取哪些措施？

解：输入偏置电流的大小，在外接电阻确定以后，主要取决于运放差分输入级 BJT 的性能，当β值太小时，将引起偏置电流增加，从使用角度看，偏置电流越小，由信号源内阻变化引起的输出电压变化也越小。

6.4　练　习　题

（1）通用型集成运放电路一般由几部分电路组成？每一部分常采用哪种基本电路？通常对每一部分性能的要求分别是什么？

（2）已知一个集成运放的开环差模增益A_{od}为 100dB，最大输出电压峰-峰值$U_{opp}=\pm14\text{V}$，分别计算差模输入电压u_i（即u_P-u_N）为 10μV、100μV、1mV、1V 和−10μV、−100μV、−1mV、−1V 时的输出电压u_o。

（3）已知几个集成运放的参数如下所示，试分别说明它们各属于哪种类型的运放。



特性指标	A_{od}	r_{id}	U_{IO}	I_{IO}	I_{IB}	$-3dBf_H$	K_{CMR}	SR	单位增益带宽
单位	dB	MΩ	mv	nA	nA	Hz	dB	V/μV	MHz
A_1	100	2	5	200	600	7	86	0.5	
A_2	130	2	0.01	2	40	7	120	0.5	
A_3	100	1000	5	0.02	0.03		86	0.5	5
A_4	100	2	2	20	150		96	65	12.5

(4) 多路电流源电路如图 6.20 所示，已知所有晶体管对称，U_{BE} 均为 0.7V。试求 I_{C1}、I_{C2} 各为多少。

(5) 电路如图 6.21 所示，T_1 与 T_2 管的特性相同，所有晶体管的 β 均相同，R_{c1} 远大于二极管的正向电阻。当 $u_{i1}=u_{i2}=0V$ 时，$u_o=0V$。

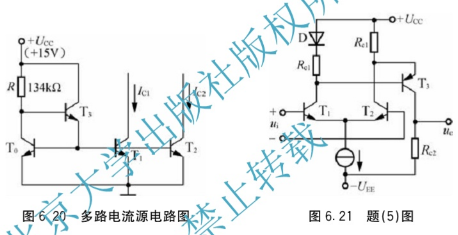


图 6.20 多路电流源电路图　　图 6.21 题(5)图

① 求解电压放大倍数的表达式。

② 当有共模输入电压时，u_o=? 简述理由。

(6) 在图 6.22 所示电路中，已知 $T_1 \sim T_3$ 管的特性完全相同，$\beta \gg 2$；反相输入端的输入电流为 i_{i1}，同相输入端的输入电流为 i_{i2}。试问：①$i_{C2}\approx$? ②$i_{B2}\approx$? ③$A_{ui}=\Delta u_o/(i_{i1}-i_{i2})\approx$?

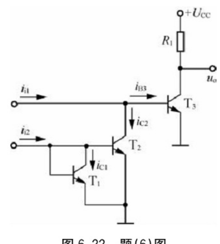


图 6.22 题(6)图

(7) 比较图 6.23 所示的两个电路，分别说明它们是如何消除交越失真和如何实现过流保护的。

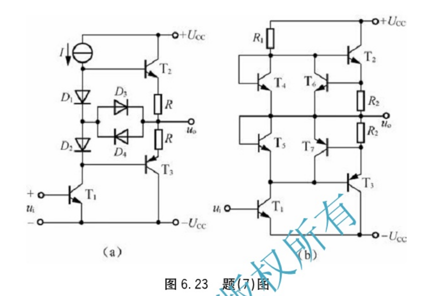


图 6.23　题(7)图

(8) 图 6.24 所示电路是某集成运放电路的一部分，由单电源供电，T_1、T_2、T_3 为放大管。试分析：①100μA 电流源的作用；②T_4 的工作区域(截止、放大、饱和)；③50μA 电流源的作用；④T_5 与 R 的作用。

(9) 电路如图 6.25 所示，试说明各晶体管的作用。

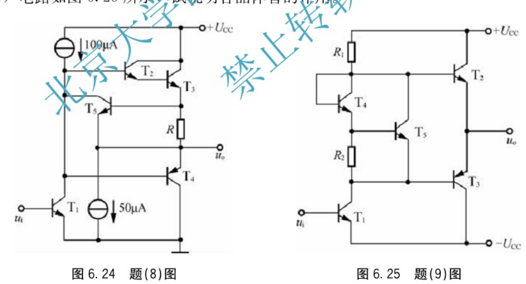


图 6.24　题(8)图　　　　图 6.25　题(9)图

(10) 图 6.26 所示为简化的高精度运放电路原理图，试分析：①两个输入端中哪个是同相输入端，哪个是反相输入端；②T_3 与 T_4 的作用；③电流源 I_3 的作用；④D_2 与 D_3 的作用。

(11) 通用型运放 F747 的内部电路如图 6.27 所示，试分析：①偏置电路由哪些元件组成？基准电流约为多少？②哪些是放大管？组成几级放大电路？每级各是什么基本电路？③T_{19}、T_{20} 和 R_8 组成的电路的作用是什么？

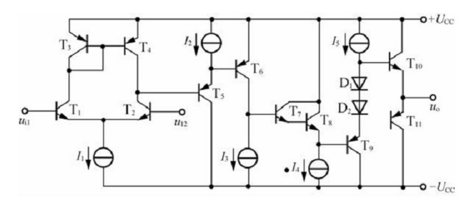


图 6.26　高精度运放电路原理图

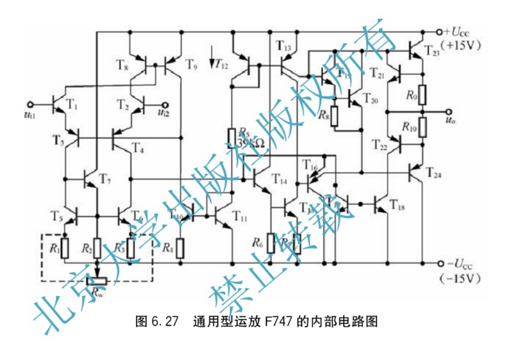


图 6.27　通用型运放 F747 的内部电路图

练习题答案

（1）解：通用型集成运放电路由输入级、中间级、输出级和偏置电路等 4 个部分组成。输入级为差分放大电路，中间级为共射放大电路，输出级为互补电路，偏置电路为电流源电路。

对输入级的要求：输入电阻大，温漂小，放大倍数尽可能大。

对中间级的要求：放大倍数大，一切措施几乎都是为了增大放大倍数。

对输出级的要求：带负载能力强，最大不失真输出电压尽可能大。

对偏置电路的要求：提供的静态电流稳定。

（2）解：根据集成运放的开环差模增益，可求得开环差模放大倍数为

$$20\lg A_{od}=100\text{dB},\ A_{od}=10^5。$$

当集成运放工作在线性区时，输出电压 $u_o=A_{od}u_i$；当 $A_{od}\ u_i$超过±14V 时，u_o不是

$+14\text{V}$，就是-14V。故 u_i(即 u_P-u_N)为 $10\mu\text{V}$、$100\mu\text{V}$、1mV、1V 和$-10\mu\text{V}$、$-100\mu\text{V}$、-1mV、-1V 时，u_o分别为 1V、10V、14V、14V、-1V、-10V、-14V、-14V。

(3) 解：A_1为通用型运放，A_2为高精度型运放，A_3为高阻型运放，A_4为高速型运放。

(4) 解：因为 T_1、T_2、T_3的特性均相同，且 U_{BE} 均相同，所以它们的基极、集电极电流均相等，设集电极电流为 I_C。先求出 R 中电流，再求解 I_{C1}、I_{C2}。

$$I_R=\frac{U_{CC}-U_{BE3}-U_{BE0}}{R}=100\mu\text{A}$$

$$I_R=I_{C0}+I_{B3}=I_{C0}+\frac{3I_B}{1+\beta}=I_C+\frac{3I_C}{\beta(1+\beta)}$$

$$I_C=\frac{\beta^2+\beta}{\beta^2+\beta+3}\cdot I_R$$

当 $\beta(1+\beta)\gg 3$ 时，$I_{C1}=I_{C2}\approx I_R=100\mu\text{A}$。

(5) 解：①在忽略二极管动态电阻的情况下：

$$A_{u1}\approx-\beta\cdot\frac{R_{c1}/\!/\frac{r_{be3}}{2}}{r_{be1}},\ A_{u2}=-\beta\cdot\frac{R_{c2}}{r_{be3}},\ A_u=A_{u1}\cdot A_{u2}。$$

② 当有共模输入电压时，u_o近似为零。由于 $R_{c1}\gg r_d$，$\Delta u_{C1}\approx\Delta u_{C2}$，因此 $\Delta u_{BE3}\approx 0$，故 $u_o\approx 0$。

(6) 解：① 因为 T_1和 T_2为镜像关系，且 $\beta\gg 2$，所以 $i_{C2}\approx i_{C1}\approx i_{i2}$。

② $i_{B3}=i_{i1}-i_{C2}\approx i_{i1}-i_{i2}$。

③ 输出电压的变化量和放大倍数分别为

$\Delta u_o=-\Delta i_{C3}R_c=-\beta_3\Delta i_{B3}R_c$，$A_{ui}=\Delta u_o/\Delta(i_{i1}-i_{i2})\approx\Delta u_o/\Delta i_{B3}=-\beta_3 R_c$。

(7) 解：在图 6.23(a)所示电路中，D_1、D_2使 T_2、T_3微导通，可消除交越失真。R为电流采样电阻，D_3对 T_2起过流保护。当 T_2导通时，$u_{D3}=u_{BE2}+i_oR-u_{D1}$，未过流时 i_oR较小，因 u_{D3}小于开启电压，故使 D_3截止；过流时因 u_{D3}大于开启电压使 D_3导通，为 T_2基极分流。D_4对 T_4起过流保护作用，原因与上述相同。

在图 6.23(b)所示电路中，T_4、T_5使 T_2、T_3微导通，可消除交越失真。R_2为电流采样电阻，T_6对 T_2起过流保护。当 T_2导通时，$u_{BE6}=i_oR_2$，未过流时 i_oR_2较小，因 u_{BE6}小于开启电压，故使 T_6截止；过流时因 u_{BE6}大于开启电压使 T_6导通，为 T_2基极分流。T_7对 T_3起过流保护作用，原因与上述相同。

(8) 解：① 为 T_1提供静态集电极电流，为 T_2提供基极电流，并作为 T_1的有源负载。

② T_4截止。因为 $u_{B4}=u_{C1}=u_o+u_R+u_{B2}+u_{B3}$，$u_{E4}=u_o$，$u_{B4}>u_{E4}$。

③ $50\mu\text{A}$ 电流源为 T_3提供射极电流，在交流等效电路中等效为阻值非常大的电阻。

④ 保护电路。$u_{BE5}=i_oR$，未过流时 T_5电流很小；过流时使 $i_{E5}>50\mu\text{A}$，T_5更多地为 T_3的基极分流。

(9) 解：T_1为共射放大电路的放大管；T_2和 T_3组成互补输出级；T_4、T_5、R_2组成偏置电路，用于消除交越失真。



（10）解：① u_{i1}为反相输入端，u_{i2}为同相输入端。

② 为 T_1和 T_2管的有源负载，将 T_1管集电极电流变化量转换到输出端，使单端输出差分放大电路的差模放大倍数近似等于双端输出时的放大倍数。

③ 为 T_6设置静态电流，并作为 T_6的集电极有源负载，可增大共射放大电路的放大能力。

④ 消除交越失真。

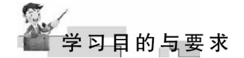
（11）解：① 由 T_{10}、T_{11}、T_9、T_8、T_{12}、T_{13}、R_5构成。

② 图 6.27 所示电路为三级放大电路：T_1～T_4构成共集-共基差分放大电路，T_{14}～T_{16}构成共集-共射-共集电路，T_{23}、T_{24}构成互补输出级。

③ 消除交越失真。互补输出级两只管子的基极之间电压 $U_{B23-B24}=U_{BE20}+U_{BE19}$，使 T_{23}、T_{24}处于微导通，从而消除交越失真。

第7章

反馈放大电路



学习目的与要求

(1) 熟练掌握反馈极性和反馈类型的判断方法，能正确判断电路中是否引入了反馈以及反馈的性质，并能根据要求引入所需的负反馈。

(2) 掌握负反馈4种组态对放大电路性能的影响。

(3) 熟练掌握引入负反馈后对放大性能的影响。

(4) 熟练掌握深度负反馈条件下A_{vf}的计算。

(5) 正确理解$A_f=A/(1+AF)$，$A_f=A/(1-AF)$公式的意义。

(6) 正确理解负反馈放大电路产生自激振荡的原因。



知识架构

- 反馈的基本概念
  - 反馈的概念
  - 反馈的极性与类型
- 负反馈放大电路的方框图及增益分析方法
  - 负反馈放大电路的方框图
  - 负反馈放大电路增益的一般表达式
  - 负反馈对放大电路性能的影响
  - 4种深度负反馈放大电路的分析方法
  - 负反馈放大电路应用举例
- 负反馈放大电路的稳定性问题
  - 产生自激振荡的条件和原因
  - 消除自激振荡的常用方法



难点

(1) 反馈组态的判别和性能指标的估算。

(2) 负反馈对放大器性能的影响。

(3) 深度负反馈条件下电压放大倍数的估算。



(1) 根据实际要求，引入适当的负反馈。

(2) 反馈类型及组态的判别。

(3) 深度负反馈条件下放大倍数的估算。

7.1　知识要点

7.1.1　反馈放大电路概述

1. 反馈的基本概念与分类

反馈放大电路如图7.1所示。

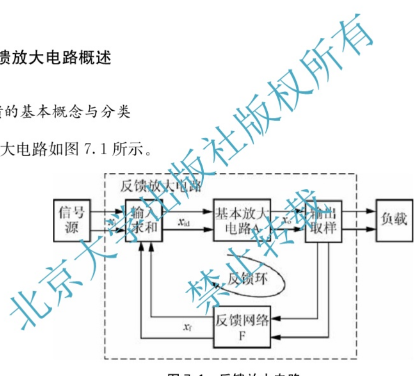


图7.1　反馈放大电路

(1) 放大电路的正向传输作用：输入信号对输出信号的控制作用。

(2) 反馈：电路输出电量(电压或电流)的一部分或全部通过反馈网络，以一定的方式送回到输入回路，从而影响输入电量(电压或电流)的过程。

(3) 开环：没有反馈网络。闭环：存在反馈网络。

(4) 内部反馈：反馈产生在器件(三极管)内部(H参数小信号模型 $h_{re}v_{ce}$)。

(5) 外部反馈：通过外接电路元件引入的反馈(分压式射极偏置电路 R_e)。

(6) 反馈放大电路：由基本放大电路、反馈网络、输出取样、输入求和组成的一个闭合环路，称为反馈环路。

只有一个反馈环路组成的放大电路，称为单环反馈放大电路。x_i 是输入信号，x_o 是输出信号，x_f 是反馈信号，x_{id} 是净输入信号。这些电量可以是电压或电流。

正向传输的增益为 $A=x_o/x_{id}$，反馈系数为 $F=x_f/x_o$。



2. 直流反馈和交流反馈

(1) 直流反馈：反馈信号中只含有直流分量。直流反馈影响电路的静态工作点。

(2) 交流反馈：反馈信号中只含有交流分量。交流反馈影响电路的交流性能。

在图7.2中，电阻 R_e 引入直流负反馈，R_e 和 R_L 引入交流反馈。

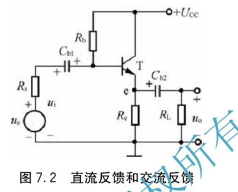


图7.2 直流反馈和交流反馈

3. 正反馈与负反馈

(1) 负反馈：反馈信号使净输入信号相比没有引入反馈时减小，放大倍数减小。

(2) 正反馈：反馈信号使净输入信号相比没有引入反馈时增加，放大倍数增加。

(3) 正负反馈的判断方法：瞬时极性法。设输入信号某一瞬时极性为正(相对于共同端有增加的趋势)，用+或↑符号标出。根据各种基本放大电路输出与输入信号间的相位关系，从输入到输出逐级标出各点电位瞬时极性，或有关支路电流的瞬时流向(设信号频率在中频区)。确定从输出到输入回路的反馈信号的瞬时极性，判断反馈信号削弱还是增强净输入信号，从而判断出正负反馈。

4. 串联反馈与并联反馈

以反馈信号与输入信号在放大电路输入端的求和方式来区分串联反馈与并联反馈。

串联反馈：以电压的形式求和，即反馈信号 x_f 和输入信号 x_i 同为电压，如图7.3(a)所示。

并联反馈：以电流的形式求和，即反馈信号 x_f 和输入信号 x_i 同为电流，如图7.3(b)所示。

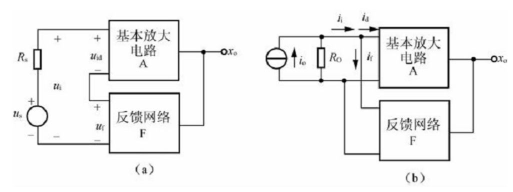


图7.3 串联反馈与并联反馈



串联负反馈要求信号源内阻 R_s 越小越好，即 u_i 不变($=u_s$)，u_f 对 u_{id} 的调节作用最强($u_{id}=u_i-u_f$)。

并联负反馈要求信号源内阻 R_s 越大越好，即 i_i 不变($=i_s$)，i_f 对 i_{id} 的调节作用最强($i_{id}=i_i-i_f$)。

5. 电压反馈与电流反馈

放大电路输出端的取样方式有以下两种形式。

(1) 电压反馈：电压取样，反馈信号是输出电压的一部分或全部，电路如图 7.4(a)所示。

(2) 电流反馈：电流取样，反馈信号是输出电流的一部分或全部，电路如图 7.4(b)所示。

(3) 判断是电压反馈还是电流反馈："输出短路法"。假设负载短路($R_L=0$)，使输出电压 $u_o=0$，看反馈信号是否还存在。若反馈信号不存在，则是电压反馈；若反馈信号还存在，则是电流反馈。

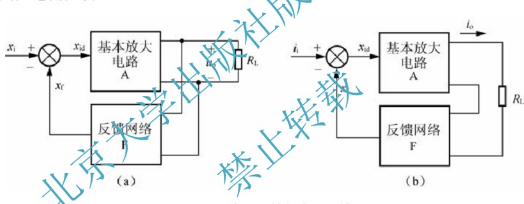


图 7.4　电压反馈与电流反馈

7.1.2　负反馈放大电路的 4 种组态

1. 电压串联负反馈

电压串联负反馈电路如图 7.5 所示。

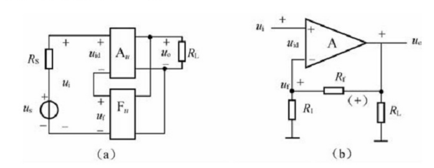


图 7.5　电压串联负反馈

$$F_u=\frac{u_f}{u_o}=\frac{R_1}{R_1+R_f}$$

电压负反馈具有稳定输出电压的作用：$R_L\downarrow\rightarrow u_o\downarrow\rightarrow u_f\downarrow\rightarrow u_{id}(u_i-u_f)\uparrow\rightarrow u_o\uparrow$。

综合电压串联负反馈放大电路输入恒压与输出恒压的特性，可称为压控电压源。

2. 电压并联负反馈

电压并联负反馈如图 7.6 所示。

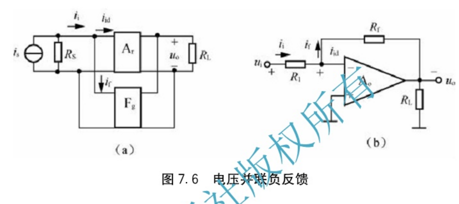


图 7.6　电压并联负反馈

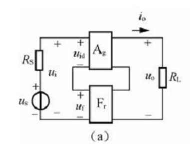
$$F_g=\frac{i_f}{u_o}=-\frac{1}{R_f}(u_o\gg u_n,\ u_n\approx 0)$$

电路具有稳定输出电压的作用：$R_L\downarrow\rightarrow u_o\downarrow\rightarrow i_f\downarrow\rightarrow i_{id}(i_i-i_f)\uparrow\rightarrow u_o\uparrow$。

综合电压并联负反馈放大电路输入恒流与输出恒压特性，可称为电流控制的电压源或电流-电压变换器。

3. 电流串联负反馈

电流串联负反馈电路如图 7.7 所示。



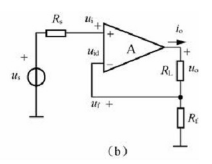


图 7.7　电流串联负反馈

$$F_r=\frac{u_f}{i_o}=R_f$$

电路具有稳定输出电流的作用：$R_L\uparrow\rightarrow i_o\downarrow\rightarrow u_f\downarrow\rightarrow u_{id}(u_i-u_f)\uparrow\rightarrow i_o\uparrow$。

可将电流串联负反馈放大电路称为电压控制的电流源或电压-电流变换器。

4. 电流并联负反馈

电流并联负反馈电路如图 7.8 所示。

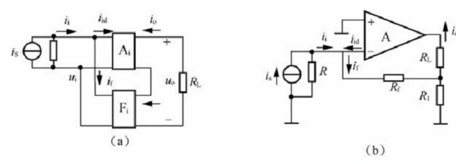


图 7.8 电流并联负反馈

$$F_{\mathrm{i}}=\frac{i_{\mathrm{f}}}{i_{\mathrm{o}}}=\frac{R_1}{R_1+R_{\mathrm{f}}}(u_{\mathrm{n}}\approx 0)$$

电流并联负反馈放大电路也可称为电流控制的电流源。

7.1.3 负反馈放大电路增益的一般表达式

如图 7.9 所示，图中 $x_{\mathrm{id}}=x_{\mathrm{i}}-x_{\mathrm{f}}$。

基本放大电路的增益(开环增益)为

$$A=\frac{x_{\mathrm{o}}}{x_{\mathrm{id}}}$$

反馈系数为

$$F=\frac{x_{\mathrm{f}}}{x_{\mathrm{o}}}$$

负反馈放大电路的增益(闭环增益)为

$$A_{\mathrm{f}}=\frac{x_{\mathrm{o}}}{x_{\mathrm{i}}}=\frac{x_{\mathrm{o}}}{x_{\mathrm{id}}+x_{\mathrm{f}}}=\frac{x_{\mathrm{o}}}{\dfrac{x_{\mathrm{o}}}{A}+Fx_{\mathrm{o}}}=\frac{A}{1+AF}$$

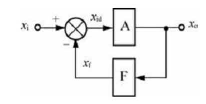


图 7.9 负反馈放大电路组成框图

对 A_{f} 的表达式进行如下讨论。

(1) $|1+\dot{A}\dot{F}|>1$ 时，$|\dot{A}_{\mathrm{f}}|<|\dot{A}|$，是负反馈。

$|1+\dot{A}\dot{F}|\gg 1$，$|\dot{A}_{\mathrm{f}}|\approx\dfrac{1}{\dot{F}}$，电路处于深度负反馈状态，闭环增益只取决于反馈系数，与开环增益数值无关。

(2) $|1+\dot{A}\dot{F}|<1$ 时，$|\dot{A}_f|>|\dot{A}|$，是正反馈。正反馈使放大电路性能不稳定，故很少在放大电路中单独引入。

(3) $|1+\dot{A}\dot{F}|=0$ 时，$|\dot{A}_f|\to\infty$，放大电路在没有输入信号时，也会有输出信号，即产生了自激振荡。

7.1.4 负反馈对放大电路性能的影响

1. 提高增益的稳定性

放大电路的增益可能由于元器参数、环境温度、电源电压、负载大小的变化等影响而不稳定。当放大电路中引入深度交流负反馈时，$|\dot{A}_f|\approx\frac{1}{\dot{F}}$，$A_f$ 几乎仅决定于反馈网络，而反馈网络通常由性能比较稳定的无源线性元件(如 R、C 等)组成，因而闭环增益是比较稳定的。

闭环增益的相对变化量为开环增益相对变化量的$\frac{1}{1+AF}$倍。即

$$\frac{dA_f}{A_f}=\frac{1}{1+AF}\cdot\frac{dA}{A}$$

2. 减小非线性失真

负反馈只能减小反馈环内产生的非线性失真，如果输入信号本身就存在失真，负反馈则无能为力。

3. 抑制反馈环内噪声

4. 负反馈对输入电阻和输出电阻的影响

1) 对输入电阻的影响

负反馈对输入电阻的影响取决于反馈网络与基本放大电路在输入回路中的连接方式，而与输出回路中反馈的取样方式无直接关系。因此，分析负反馈对输入电阻的影响时，只需画出输入回路的连接方式。

(1) 串联负反馈提高输入电阻。

$$R_{if}=\frac{u_i}{i_i}=\frac{(1+AF)u_{id}}{i_i}=(1+AF)R_i$$

即引入串联负反馈后，输入电阻是开环输入电阻的$(1+AF)$倍。

(2) 并联负反馈减小输入电阻。

$$R_{if}=\frac{u_i}{i_i}=\frac{u_i}{(1+AF)i_{id}}=\frac{R_i}{1+AF}$$

即引入并联负反馈后，闭环输入电阻是开环输入电阻的 $1/(1+AF)$倍。

2）负反馈对放大电路输出电阻的影响

负反馈对输出电阻的影响取决于反馈网络在放大电路输出回路中的取样方式，与反馈网络在输入回路的连接方式无直接关系。

(1) 电压负反馈使输出电阻减小。输入信号一定时，电压负反馈的输出趋于一恒压源，其输出电阻很小。闭环输出电阻为无反馈时开环输出电阻的 $1/(1+AF)$倍。

(2) 电流负反馈使输出电阻增加。输入信号一定时，电流负反馈的输出趋于一恒流源，其输出电阻很大。闭环输出电阻为无反馈时开环输出电阻的$(1+AF)$倍。

7.2 典型例题分析

例题 1：在图 7.10 所示的各电路中，哪些元件组成了级间反馈通路？它们所引入的反馈是正反馈还是负反馈？是直流反馈还是交流反馈？(设各电路中电容的容抗对交流信号均可忽略。)

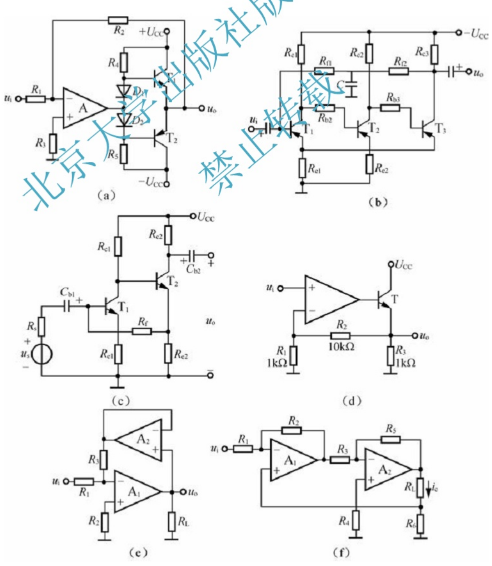


图 7.10 例题 1 图

解：图 7.10(a)中，由电阻 R_2 组成反馈通路，引入负反馈，交、直流反馈均有。

图 7.10(b)中，由 R_{e1} 引入负反馈，交、直流反馈均有，由 R_{f1}、R_{f2} 引入直流负反馈。

图 7.10(c)中，由 R_f、R_{e2} 引入负反馈，交、直流反馈均有。

图 7.10(d)中，由 R_1、R_2 引入负反馈，交、直流反馈均有。

图 7.10(e)中，由 A_2、R_3 引入负反馈，交、直流反馈均有。

图 7.10(f)中，由 R_6 引入负反馈，交、直流反馈均有。

例题 2：试判断图题 7.2.1 所示各电路的级间交流反馈的组态。

解：(a)图中 R_2、R_1 引入电压并联负反馈。

(b)图中，R_{e1} 引入电流串联负反馈。

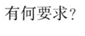
(c)图中，R_f、R_{e2} 引入电流并联负反馈。

(d)图中，R_2、R_1 引入电压串联负反馈。

(e)图中，A_2、R_3 引入电压并联负反馈。

(f)图中，R_6 引入电流串联负反馈。

例题 3：在图 7.11 所示的两电路中，从反馈的效果来考虑，对信号源内阻 R_S 的大小有何要求？



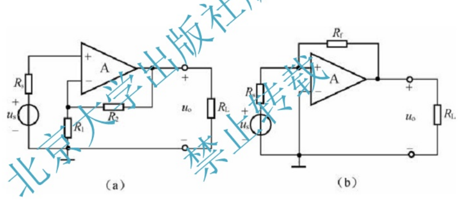


图 7.11　例题 3 图

解：图 7.11(a)中引入串联负反馈，故从反馈效果考虑，要求 R_S 越小越好。

图 7.11(b)中引入并联负反馈，故从反馈效果考虑，要求 R_S 越大越好。

例题 4：电路如图 7.12 所示，①分别说明 R_{f1}、R_{f2} 引入的两路反馈的类型及各自的主

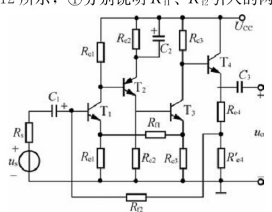


图 7.12　例题 4 图



要作用；②指出这两路反馈在影响该放大电路性能方面可能出现的矛盾是什么？③为了消除上述可能出现的矛盾，有人提出将 R_{f2} 断开，此方法是否可行？为什么？你认为怎样才能消除这个矛盾？

解：① R_{f1} 在第一、三级间引入交、直流负反馈，此直流负反馈能稳定前三级的静态工作点，其交流反馈为电流串联负反馈，可稳定第三级的输出电流，同时提高整个放大电路的输入电阻；R_{f2} 在第一、四级间引入交、直流负反馈，其中直流负反馈为 T_1 提供直流偏置，且稳定各级的静态工作点，而其交流反馈为电压并联负反馈，可稳定该电路的输出电压，即降低电路的输出电阻，另外也降低了整个电路的输入电阻。

② R_{f1} 的引入使 R_{if} 上升，而 R_{f2} 的引入使 R_{if} 下降，产生矛盾。

③ 不能断开 R_{f2}，因为 R_{f2} 是 T_1 的偏置电阻，断开 R_{f2} 后电路不能正常工作。消除上述矛盾的方法是在 R'_{e4} 的两端并联一容量足够大的电容器，去掉 R_{f2} 上的交流负反馈，这对输出电压的稳定不会有很大影响，因为 T_4 是射极输出器。

例题 5：试指出图 7.13 所示电路能否实现规定的功能，若不能，应如何修改？

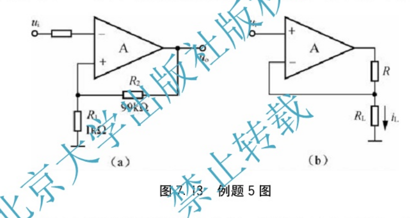


图 7.13　例题 5 图

解：图 7.13(a)所示电路不能实现规定的功能，因其引入了正反馈，故应将运放的同相端与反相端互换位置。图 7.13(b)所示电路也不能实现规定的功能，应将 R 与 R_L 互换位置。

例题 6：设图 7.14 所示电路中的开环增益 $\dot{A}$ 很大。①指出所引反馈的类型；②写出输出电流 I_o 的表达式；③说明该电路的功能。

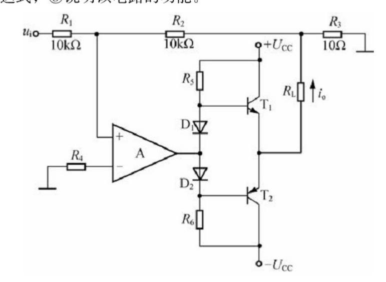


图 7.14　例题 6 图

解：① 由 R_2、R_3引入了电流并联负反馈。

② 在深度负反馈条件下(因开环增益很大)，由“虚短”、“虚断”可知

$u_n \approx u_p \approx 0$，$i_f \approx -i_i = -\dfrac{u_i}{R_i}$，$i_f = \dfrac{R_3}{R_2+R_3} i_o$，$i_o = -\dfrac{R_2+R_3}{R_1 R_3} u_i$，

$R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega$，$R_3 = 10\Omega$，$R_2 \gg R_3$，

则 $i_o \approx -\dfrac{u_i}{R_3} = -\dfrac{u_i}{10\Omega}$。

③ 此电路可视为压控电流源。

例题 7：由集成运放 A 及 BJT T_1、T_2组成的放大电路如图 7.15 所示，试分别按下列要求将信号源 v_s、电阻 R_f正确接入该电路。①引入电压串联负反馈；②引入电压并联负反馈；③引入电流串联负反馈；④引入电流并联负反馈。

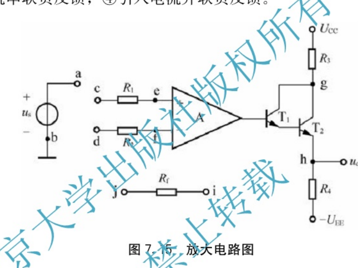


图 7.15 放大电路图

解：① a—c、b—d、h—i、f—j。② a—d、b—c、h—i、f—j。

③ a—d、b—c、g—i、e—j。④ a—c、b—d、g—i、e—j。

例题 8：某反馈放大电路的框图如图 7.16 所示，已知其开环电压增益 $A_V = 2000$，反馈系数 $F_V = 0.0495$。如输出电压 u_o为 2V，求输入电压 u_i、反馈电压 u_f及净输入电压 u_{id}的值。

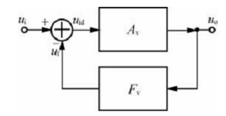


图 7.16 反馈放大电路框图

解：

$$A_{uf} = \frac{A_u}{1 + A_u F_u} = 20$$

$$u_{\mathrm{i}}=\frac{u_{\mathrm{o}}}{A_{\mathrm{uf}}}=0.1\mathrm{V}$$

$$u_{\mathrm{f}}=F_{\mathrm{u}}u_{\mathrm{o}}=0.099\mathrm{V}$$

$$u_{\mathrm{id}}=\frac{u_{\mathrm{o}}}{A_{u}}=0.001\mathrm{V}$$

例题 9：由运放组成的同相放大电路中，运放的 $A_{\mathrm{VO}}=10^{6}$，$R_{\mathrm{f}}=47\mathrm{k\Omega}$，$R_{1}=5.1\mathrm{k\Omega}$，求反馈系数和闭环电压增益。

解：$F_{\mathrm{v}}=\dfrac{R_{1}}{R_{1}+R_{\mathrm{f}}}\approx0.098$；$A_{\mathrm{uf}}=\dfrac{A_{\mathrm{uo}}}{1+A_{\mathrm{uo}}F_{\mathrm{u}}}\approx10.2$。

例题 10：一放大电路的开环增益为 $A_{\mathrm{uo}}=10^{4}$，当它接成负反馈放大电路时，其闭环电压增益为 $A_{\mathrm{uf}}=50$，若 A_{uo}变化 10%，问 A_{uf}变化多少？

解：因为 $1+A_{\mathrm{uo}}F_{\mathrm{u}}=\dfrac{A_{\mathrm{uo}}}{A_{\mathrm{uf}}}=\dfrac{10^{4}}{50}=200$，

所以当 A_{uo}变化 10%时，A_{uf}变化$\dfrac{\mathrm{d}A_{\mathrm{uf}}}{A_{\mathrm{uf}}}=\dfrac{1}{200}\times10\%=0.05\%$。

例题 11：图 7.10 所示电路中，哪些电路能够稳定输出电压？哪些电路能够稳定输出电流？哪些电路能够提高输出电阻？哪些电路能够降低输出电阻？

解：稳定输出电压的有(a)、(d)、(e)。

稳定输出电流的有(b)、(c)、(f)。

提高输出电阻的有(b)、(d)、(f)。

降低输出电阻的有(a)、(d)、(e)。



7.3 自 测 题

自测题一：判断下列说法是否正确。

(1) 若放大电路的放大倍数为负，则引入的反馈一定是负反馈。 (　　)

(2) 负反馈放大电路的增益与组成它的基本放大电路的增益量纲相同。 (　　)

(3) 若放大电路引入负反馈，则负载电阻变化时，输出电压基本不变。 (　　)

(4) 阻容耦合放大电路的耦合电容、旁路电容越多，引入负反馈后，越容易产生低频振荡。 (　　)

(5) 只要在放大电路中引入反馈，就一定能使其性能得到改善。 (　　)

(6) 放大电路的级数越多，引入的负反馈越强，电路的放大倍数也就越稳定。 (　　)

(7) 反馈量仅仅取决于输出量。 (　　)

(8) 既然电流负反馈能稳定输出电流，那么必然能稳定输出电压。 (　　)

解：(1) × (2) √ (3) × (4) √ (5) × (6) × (7) √ (8) ×

自测题二：选择正确答案填入空内。

(1) 已知交流负反馈有以下 4 种组态。

A. 电压串联负反馈　　B. 电压并联负反馈

C. 电流串联负反馈　　D. 电流并联负反馈

选择合适的答案填入下列空格内，只填入 A、B、C 或 D。

① 欲得到电流-电压转换电路，应在放大电路中引入________。

② 欲将电压信号转换成与之成比例的电流信号，应在放大电路中引入________。

③ 欲减小电路从信号源索取的电流，增大带负载能力，应在放大电路中引入________。

④ 欲从信号源获得更大的电流，并稳定输出电流，应在放大电路中引入________。

解：① B　② C　③ A　④ D

(2) 选择合适的答案填入空内

① 对于放大电路，所谓开环是指________。

A. 无信号源　B. 无反馈通路　C. 无电源　D. 无负载

而所谓闭环是指________。

A. 考虑信号源内阻　B. 存在反馈通路　C. 接入电源　D. 接入负载

② 在输入量不变的情况下，若引入反馈后________，则说明引入的反馈是负反馈。

A. 输入电阻增大　B. 输出量增大　C. 净输入量增大　D. 净输入量减小

③ 直流负反馈是指________。

A. 直接耦合放大电路中所引入的负反馈

B. 只有放大直流信号时才有的负反馈

C. 在直流通路中的负反馈

④ 交流负反馈是指________。

A. 阻容耦合放大电路中所引入的负反馈

B. 只有放大交流信号时才有的负反馈

C. 在交流通路中的负反馈

⑤ 为了实现下列目的，应引入何种负反馈?

为了稳定静态工作点，应引入 ________。

为了稳定放大倍数，应引入 ________。

为了改变输入电阻和输出电阻，应引入 ________。

为了抑制温漂，应引入 ________。

为了展宽频带，应引入 ________。

A. 直流负反馈　B. 交流负反馈

解：①B　B　②D　③C　④C　⑤A　B　B　A　B

(3) 选择合适答案填入空内。

A. 电压　B. 电流　C. 串联　D. 并联

① 为了稳定放大电路的输出电压，应引入________负反馈。
② 为了稳定放大电路的输出电流，应引入________负反馈。
③ 为了增大放大电路的输入电阻，应引入________负反馈。
④ 为了减小放大电路的输入电阻，应引入________负反馈。
⑤ 为了增大放大电路的输出电阻，应引入________负反馈。
⑥ 为了减小放大电路的输出电阻，应引入________负反馈。

解：①A　②B　③C　④D　⑤B　⑥A

自测题三：分析计算题。

(1) 判断图 7.17 所示各电路中是否引入了反馈；若引入了反馈，则判断是正反馈还是负反馈；若引入了交流负反馈，则判断是哪种组态的负反馈，并求出反馈系数和深度负反馈条件下的电压放大倍数 $\dot{A}_{uf}$ 或 $\dot{A}_{usf}$。设图中所有电容对交流信号均可视为短路。

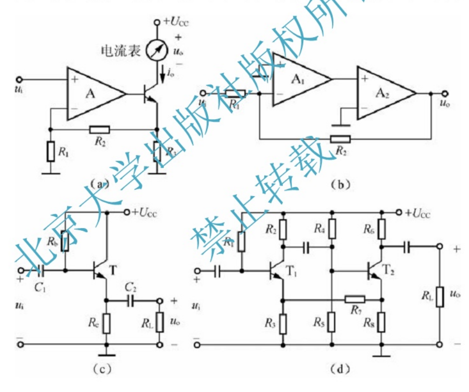


图 7.17　题(1)图

解：图 7.17(a)所示电路中引入了电流串联负反馈。反馈系数和深度负反馈条件下的电压放大倍数 $\dot{A}_{uf}$分别为

$$\dot{F}=\frac{R_1R_3}{R_1+R_2+R_3}$$

$$\dot{A}_{uf}\approx\frac{R_1+R_2+R_3}{R_1R_3}\cdot R_L$$

式中：R_L为电流表的等效电阻。

图 7.17(b)所示电路中引入了电压并联负反馈。反馈系数和深度负反馈条件下的电压

放大倍数 $\dot{A}_{vf}$ 分别为

$$\dot{F}=-\frac{1}{R_2}$$

$$\dot{A}_{uf}\approx-\frac{R_2}{R_1}$$

图 7.17(c)所示电路中引入了电压串联负反馈。反馈系数和深度负反馈条件下的电压放大倍数 $\dot{A}_{uf}$ 分别为

$$\dot{F}=1$$

$$\dot{A}_{uf}\approx1$$

图 7.17(d)所示电路中引入了正反馈。

(2) 电路如图 7.18 所示。

① 合理连线，接入信号源和反馈，使电路的输入电阻增大，输出电阻减小。

② 若 $|\dot{A}_u|=\dfrac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}=20$，则 R_f 应取多少千欧？

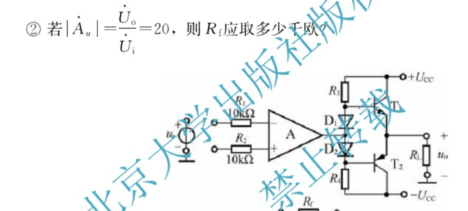


图 7.18　题(2)图

解：①应引入电压串联负反馈，如图 7.19 所示。

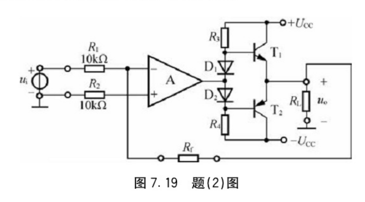


图 7.19　题(2)图

② 因 $\dot{A}_u\approx1+\dfrac{R_f}{R_1}=20$，故 $R_f=190\text{k}\Omega$。

(3) 已知一个负反馈放大电路的基本放大电路的对数幅频特性如图 7.20 所示，反馈网络由纯电阻组成。试问：若要求电路稳定工作，即不产生自激振荡，则反馈系数的上限

值为多少分贝？简述理由。

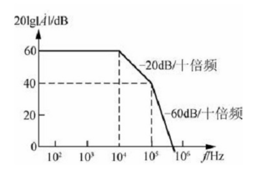


图 7.20　放大电路的对数幅频特性图

解：因为 $f=10^5$Hz 时，$20\lg|\dot{A}|=40$dB，$\varphi_A'=-180°$；为使此时 $20\lg|\dot{A}\dot{F}|<0$，则需 $20\lg|\dot{F}|<-40$dB，即 $|\dot{F}|<10^{-2}$。

7.4　练　习　题

（1）判断图 7.21 所示各电路中是否引入了反馈，是直流反馈还是交流反馈，是正反馈还是负反馈。设图中所有电容对交流信号均可视为短路。

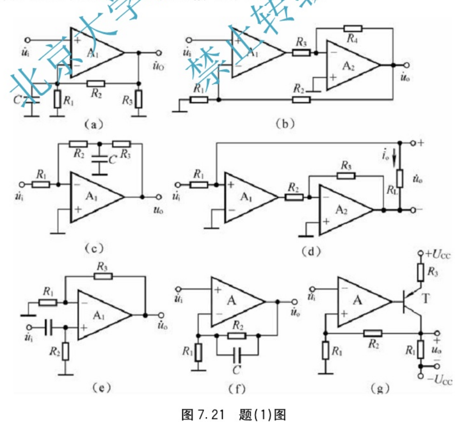
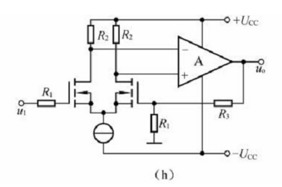


图 7.21　题(1)图



(h)

图 7.21　题(1)图(续)

(2) 电路如图 7.22 所示，要求同上题。

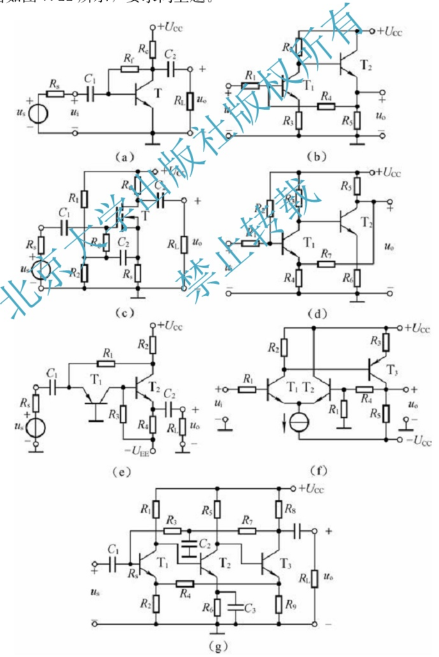


图 7.22　题(2)图

(3) 分别判断图 7.21(d)～(h)所示各电路中引入了哪种组态的交流负反馈，并计算它们的反馈系数。

(4) 分别判断图 7.22(a)、(b)、(e)、(f)、(g)所示各电路中引入了哪种组态的交流负反馈，并计算它们的反馈系数。

(5) 估算图 7.21(d)～(h)所示各电路在深度负反馈条件下的电压放大倍数。

(6) 估算图 7.22(e)、(f)、(g)所示电路在深度负反馈条件下的电压放大倍数。

(7) 分别说明图 7.21(d)～(h)所示各电路因引入交流负反馈而使得放大电路输入电阻和输出电阻所产生的变化。只需说明是增大还是减小即可。

(8) 分别说明图 7.22(a)、(b)、(c)、(e)、(f)、(g)所示各电路因引入交流负反馈而使得放大电路输入电阻和输出电阻所产生的变化。只需说明是增大还是减小即可。

(9) 电路如图 7.23 所示，已知集成运放的开环差模增益和差模输入电阻均接近于无穷大，最大输出电压幅值为±14V。填空

电路引入了 ________(填入反馈组态)交流负反馈，电路的输入电阻趋近于________，电压放大倍数 $A_{uf}=u_o/u_i\approx$________。设 $u_i=1V$，则 $u_o\approx$________ V；若 R_1 开路，则 u_o 变为________ V；若 R_1 短路，则 u_o 变为________ V；若 R_2 开路，则 u_o 变为 ________ V；若 R_2 短路，则 u_o 变为 ________ V。

(10) 电路如图 7.24 所示，试说明电路引入的是共模负反馈，即反馈仅对共模信号起作用。

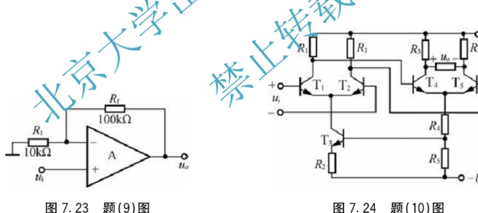


图 7.23　题(9)图　　　　图 7.24　题(10)图

(11) 已知一个负反馈放大电路的 $A=10^5$，$F=2\times10^{-3}$。① $A_f=$？ ②若 A 的相对变化率为 20%，则 A_f 的相对变化率为多少？

(12) 已知一个电压串联负反馈放大电路的电压放大倍数 $A_{uf}=20$，其基本放大电路的电压放大倍数 A_u 的相对变化率为 10%，A_{uf} 的相对变化率小于 0.1%，试问 F 和 A_u 各为多少？

(13) 电路如图 7.25 所示。试问：若以稳压管的稳定电压 U_Z 作为输入电压，则当 R_2 的滑动端位置变化时，输出电压 U_o 的调节范围为多少？

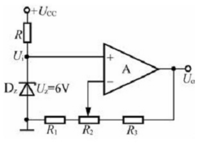


图 7.25　题(13)图

(14) 已知负反馈放大电路的 $\dot{A}=\dfrac{10^4}{\left(1+\mathrm{j}\dfrac{f}{10^4}\right)\left(1+\mathrm{j}\dfrac{f}{10^5}\right)^2}$。试分析：为了使放大电路能够稳定工作(即不产生自激振荡)，反馈系数的上限值应为多少？

(15) 以集成运放作为放大电路，引入合适的负反馈，分别达到下列目的，要求画出电路图来。

① 实现电流-电压转换电路。

② 实现电压-电流转换电路。

③ 实现输入电阻高、输出电压稳定的电压放大电路。

④ 实现输入电阻低、输出电流稳定的电流放大电路。

(16) 电路如图 7.26 所示。

① 用电阻引入合适的交流负反馈，使输入电压 u_i 转换成稳定的输出电流 i_L。

② 若 $u_i=0\sim5\mathrm{V}$ 时，$i_L=0\sim10\mathrm{mA}$，则反馈电阻 R_f 应取多少？

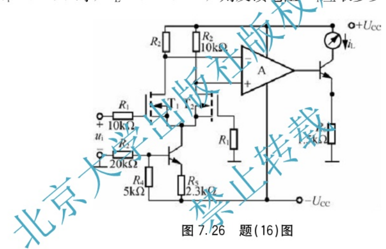


图 7.26 题(16)图

(17) 试分析如图 7.27 所示的各电路中是否引入了正反馈(即构成自举电路)，如有，则在电路中标出，并简述正反馈起什么作用。设电路中所有电容对交流信号均可视为短路。

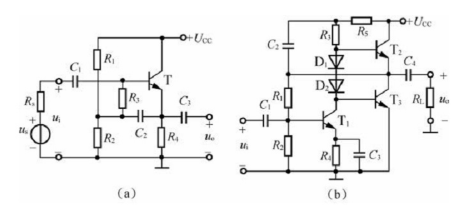


图 7.27 题(17)图

(18) 在图 7.28 所示电路中，已知 A 为电流反馈型集成运放，试问



① 中频电压放大倍数。

② 上限截止频率。

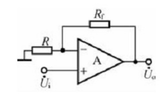


图 7.28　题(18)图

(19) 已知集成运放的开环差模增益 $A_{od}=2\times10^5$，差模输入电阻 $r_{id}=2\text{M}\Omega$，输出电阻 $r_o=200\Omega$。试用方块图法分别求解图 7.29 所示各电路的 A、F、A_f、R_{if}、R_{of}。

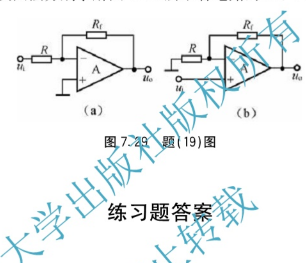


图 7.29　题(19)图

练习题答案

(1) 解：图 7.21(a)所示电路中引入了直流负反馈。

图 7.21(b)所示电路中引入了交、直流正反馈。

图 7.21(c)所示电路中引入了直流负反馈。

图 7.21(d)、(e)、(f)、(g)、(h)所示各电路中均引入了交、直流负反馈。

(2) 解：图 7.22(a)所示电路中引入了交、直流负反馈。

图 7.22(b)所示电路中引入了交、直流负反馈。

图 7.22(c)所示电路中通过 R_s 引入直流负反馈，通过 R_s、R_1、R_2 并联引入交流负反馈，通过 C_2、R_g 引入交流正反馈。

图 7.22(d)、(e)、(f)所示各电路中均引入了交、直流负反馈。

图 7.22(g)所示电路中通过 R_3 和 R_7 引入直流负反馈，通过 R_4 引入交、直流负反馈。

(3) 解：各电路中引入交流负反馈的组态及反馈系数分别如下。

图 7.21(d)电流并联负反馈：$\dot{F}=\dot{I}_f/\dot{I}_o=1$。

图 7.21(e)电压串联负反馈：$\dot{F}=\dot{U}_f/\dot{U}_o=\dfrac{R_1}{R_1+R_2}$。

图 7.21(f)电压串联负反馈：$\dot{F}=\dot{U}_f/\dot{U}_o=1$。

图 7.21(g)电压串联负反馈：$\dot{F}=\dot{U}_f/\dot{U}_o=\dfrac{R_1}{R_1+R_2}$。

图 7.21(h)电压串联负反馈：$\dot{F}=\dot{U}_{\rm f}/\dot{U}_{\rm o}=\dfrac{R_1}{R_1+R_3}$。

(4) 解：各电路中引入交流负反馈的组态及反馈系数分别如下。

图 7.21(a)电压并联负反馈：$\dot{F}=I_{\rm f}/U_{\rm o}=-1/R$。

图 7.21(b)电压并联负反馈：$\dot{F}=I_{\rm f}/U_{\rm o}=-1/R_4$。

图 7.21(e)电流并联负反馈：$\dot{F}=\dot{I}_{\rm f}/\dot{I}_{\rm o}=\dfrac{R_2}{R_1+R_2}$。

图 7.22(f)电压串联负反馈：$\dot{F}=\dot{U}_{\rm f}/\dot{U}_{\rm o}=\dfrac{R_1}{R_1+R_4}$。

图 7.22(g)电流串联负反馈：$\dot{F}=\dot{U}_{\rm f}/\dot{I}_{\rm o}=-\dfrac{R_2R_9}{R_2+R_4+R_9}$。

(5) 解：各电路在深度负反馈条件下的电压放大倍数如下。

图 7.22(d)$\dot{A}_{uf}=\dfrac{\dot{U}_{\rm o}}{\dot{U}_{\rm i}}\approx\dfrac{\dot{I}_{\rm o}R_{\rm L}}{\dot{I}_{\rm i}R_1}\approx\dfrac{\dot{I}_{\rm o}R_{\rm L}}{\dot{I}_{\rm f}R_1}=\dfrac{R_{\rm L}}{R_1}$，(e)$\dot{A}_{uf}=\dfrac{\dot{U}_{\rm o}}{\dot{U}_{\rm i}}\approx\dfrac{\dot{U}_{\rm o}}{\dot{U}_{\rm f}}=1+\dfrac{R_3}{R_1}$，

图 7.22(f)$\dot{A}_{uf}=\dfrac{\dot{U}_{\rm o}}{\dot{U}_{\rm i}}\approx\dfrac{\dot{U}_{\rm o}}{\dot{U}_{\rm f}}=1$，(g)$\dot{A}_{uf}=\dfrac{\dot{U}_{\rm o}}{\dot{U}_{\rm i}}\approx\dfrac{\dot{U}_{\rm o}}{\dot{U}_{\rm f}}=1+\dfrac{R_2}{R_1}$，

图 7.22(h)$\dot{A}_{uf}=\dfrac{\dot{U}_{\rm o}}{\dot{U}_{\rm i}}\approx\dfrac{\dot{U}_{\rm o}}{\dot{U}_{\rm f}}=1+\dfrac{R_3}{R_1}$。

(6) 解：各电路在深度负反馈条件下的电压放大倍数如下。

图 7.22(e)$\dot{A}_{usf}=\dfrac{\dot{U}_{\rm o}}{\dot{U}_{\rm i}}\approx\dfrac{\dot{I}_{\rm o}(R_4/\!/R_{\rm L})}{\dot{I}_{\rm f}R_{\rm s}}=(1+\dfrac{R_1}{R_2})\cdot\dfrac{R'_{\rm L}}{R_{\rm s}}$

图 7.22(f)$\dot{A}_{uf}=\dfrac{\dot{U}_{\rm o}}{\dot{U}_{\rm i}}\approx\dfrac{\dot{U}_{\rm o}}{\dot{U}_{\rm f}}=1+\dfrac{R_4}{R_1}$

图 7.22(g)$\dot{A}_{uf}=\dfrac{\dot{U}_{\rm o}}{\dot{U}_{\rm i}}\approx\dfrac{\dot{I}_{\rm o}(R_7/\!/R_8/\!/R_{\rm L})}{\dot{U}_{\rm f}}=-\dfrac{(R_2+R_4+R_9)(R_7/\!/R_8/\!/R_{\rm L})}{R_2R_9}$

(7) 解：图 7.21(d)所示电路因引入负反馈而使输入电阻减小，输出电阻增大。

图 7.21(e)～(h)所示各电路均因引入负反馈而使输入电阻增大，输出电阻减小。

(8) 解：各电路因引入交流负反馈使放大电路输入和输出电阻所产生的变化如下。

图 7.22 所示图(a)输入电阻减小，输出电阻减小。图(b)输入电阻减小，输出电阻减小。图(c)输入电阻增大，输出电阻增大。图(e)输入电阻减小，输出电阻增大。图(f)输入电阻增大，输出电阻减小。图(g)输入电阻增大，输出电阻增大。

(9) 解：电压串联负反馈；无穷大；11；11；1；14；14；1。

(10) 解：若 $u_{\rm B1}=u_{\rm B2}$ 增大，则产生下列过程。

$u_{B1}=u_{B2}\uparrow\rightarrow u_{C1}=u_{C2}\downarrow(u_{B4}=u_{B5}\downarrow)\rightarrow i_{E4}=i_{E5}\downarrow\rightarrow u_{R5}\downarrow(u_{B3}\downarrow)\rightarrow i_{C3}\downarrow\rightarrow u_{R1}\downarrow$

$u_{C1}=u_{C2}\uparrow\leftarrow$

说明电路对共模信号有负反馈作用。

(11) 解：① 因为 $AF=200\gg1$，所以 $A_f\approx1/F=500$。

② 根据题目所给数据，可知$\frac{1}{1+AF}=\frac{1}{1+2\times10^2}\approx0.005$，$A_f$相对变化率为 A 的相对变化率的$\frac{1}{1+AF}$倍，故 A_f的相对变化率约为 0.1%。

(12) 解：先求解 AF，再根据深度负反馈的特点求解 A。

$AF\approx\frac{10\%}{0.1\%}=100$，$AF\gg1$，

所以 $F\approx\frac{1}{A_f}=\frac{1}{20}=0.05$，$A_u=A=\frac{AF}{F}\approx2000$

(13) 解：U_o的调节范围约为

$\frac{R_1+R_2+R_3}{R_1+R_2}\cdot U_Z\sim\frac{R_1+R_2+R_3}{R_1}\cdot U_Z$，即$\frac{R_1+R_2+R_3}{R_1+R_2}\cdot 6\text{V}\sim\frac{R_1+R_2+R_3}{R_1}\cdot 6\text{V}$。

(14) 解：根据放大倍数表达式可知，放大电路高频段有 3 个截止频率，分别为

$$f_{L1}=10^4\text{Hz}，f_{L2}=f_{L3}=10^5\text{Hz}$$

因为 $f_{L2}=f_{L3}=10f_{L1}$，所以在 $f=f_{L2}=f_{L3}$时，$|\dot{A}|$约为 60dB，附加相移约为 $-180°$。为了使 $f=f_{L2}=f_{L3}$时的 $20\lg|\dot{A}\dot{F}|$小于 0，即不满足自激振荡的幅值条件，反馈系数 $20\lg|\dot{F}|$的上限值应为 -60dB，即 $\dot{F}$ 的上限值为 10^{-3}。

(15) 解：可实现题目①、②、③、④要求的参考电路分别如图 7.30(a)、(b)、(c)、(d)所示。

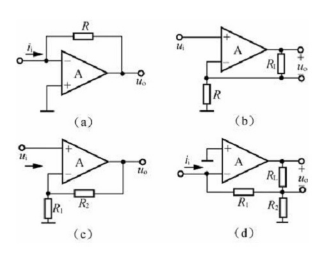


图 7.30　题(15)图

(16) 解：①引入电流串联负反馈，通过电阻 R_f 将三极管的发射极与 T_2 管的栅极连接起来，如图 7.31 所示。

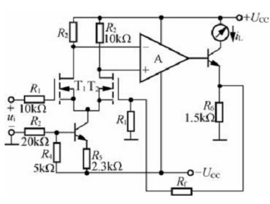


图 7.31　题(16)图

② 首先求解 $\dot{F}$，再根据 $\dot{A}_f \approx 1/\dot{F}$ 求解 R_f。

$\dot{F}=\dfrac{R_1 R_f}{R_1+R_f+R_6}$，$\dot{A}_f \approx \dfrac{R_1+R_f+R_6}{R_1 R_f}$，

代入数据得$\dfrac{10+R_f+1.5}{10\times1.5}=\dfrac{10}{5}$

所以 $R_f=18.5\text{k}\Omega$。

(17) 解：图 7.27(a)所示电路中通过 C_2、R_3 引入了正反馈，其作用是提高输入电阻，改善跟随特性。

图 7.27(b)所示电路中通过 C_2、R_3 引入了正反馈，其作用是提高第二级跟随范围，增大放大倍数，使输出的正方向电压有可能高于电源电压。

(18) 解：① $\dot{A}_u \approx 1+\dfrac{R_f}{R}$

② 画出的图 7.28 所示电路中集成运放的等效电路如图 7.32 所示。

因为 r_o 很小，故反相输入端电位为 $\dot{U}_n=\dot{U}_i-\dot{I}_i r_o \approx \dot{U}_i$。

将集成运放的内部电路替换为图 6.7.6 所示电路，可得 $\dot{I}_i=\text{j}\omega C\dot{U}_o$。

$$\dot{I}_i \approx \frac{\dot{U}_i}{R}+\frac{\dot{U}_i-\dot{U}_o}{R_f}=\frac{\dot{U}_i(R+R_f)}{RR_f}-\frac{\dot{U}_o}{R_f}=\text{j}\omega C\dot{U}_o$$

$$\dot{U}_o\left(\frac{1+\text{j}\omega R_f C}{R_f}\right)\approx\frac{\dot{U}_i(R+R_f)}{RR_f}$$

$$\dot{A}_u=\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}\approx\left(1+\frac{R_f}{R}\right)\cdot\frac{1}{1+\text{j}\omega R_f C}$$

所以上限截止频率为 $f_H=\dfrac{1}{2\pi R_f C}$。

(19) 解：图 7.29(a)所示反馈放大电路的基本放大电路如图 7.33(a)所示，因此 A、F、A_f 分析如下。



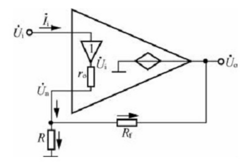


图 7.32 题(18)图

$$A=\frac{\Delta u_o}{\Delta i_i}=\frac{\Delta u_o}{-\dfrac{\Delta u_i}{r_{id}/\!/R_f}}=-A_{od}(r_{id}/\!/R_f)$$

$$F=\frac{\Delta i_F}{\Delta u_o}=-\frac{1}{R_f}$$

$$1+AF=1+A_{od}(r_{id}/\!/R_f)\cdot\frac{1}{R_f}\approx A_{od}\cdot(r_{id}/\!/R_f)\cdot\frac{1}{R_f}$$

$$A_f=\frac{-A_{od}(r_{id}/\!/R_f)}{1+A_{od}\cdot(r_{id}/\!/R_f)\cdot\dfrac{1}{R_f}}$$

R_i、R_o、R_{if}、R_{of}分别为

$$R_i=r_{id}/\!/R_f$$

$$R_o=r_o/\!/R_f$$

$$R_{if}\approx\frac{r_{id}/\!/R_f}{A_{od}\cdot(r_{id}/\!/R_f)\cdot\dfrac{1}{R_f}}=\frac{R_f}{A_{od}}$$

$$R_{of}\approx\frac{r_o/\!/R_f}{A_{od}\cdot(r_{id}/\!/R_f)\cdot\dfrac{1}{R_f}}=\frac{(r_o/\!/R_f)(r_{id}+R_f)}{A_{od}r_{id}}$$

若 $r_{id}\gg R_f$，$r_o\ll R_f$，则

$$A\approx -A_{od}R_f$$

$$R_i\approx R_f$$

$$R_o\approx r_o$$

$$A_f=\frac{-A_{od}R_f}{1+A_{od}}$$

$$R_{if}\approx R_f/A_{od}$$

$$R_{of}\approx r_o/A_{od}$$

整个电路的输入电阻约为$(R+R_f/A_{od})$。

图 7.29(b)所示反馈放大电路的基本放大电路如图 7.33(b)所示，因此 A、F、A_f、R_{if}、R_{of}分析如下。

$$R_i=r_{id}+R/\!/R_f$$

$$R_o = r_o // (R + R_f)$$

$$u_i = u_{id} \cdot \frac{r_{id} + R // R_f}{r_{id}}$$

$$A = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_i} = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_{id} \cdot \dfrac{r_{id} + R // R_f}{r_{id}}} = A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f}$$

$$F = \frac{\Delta u_f}{\Delta u_o} = \frac{R}{R + R_f}$$

$$1 + AF = 1 + A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f} \cdot \frac{R}{R + R_f} \approx A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f} \cdot \frac{R}{R + R_f}$$

$$A_f = \frac{A_{od} \cdot \dfrac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f}}{1 + A_{od} \cdot \dfrac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f} \cdot \dfrac{R}{R + R_f}}$$

$$R_{if} \approx (r_{id} + R // R_f) A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f} \cdot \frac{R}{R + R_f} = A_{od} \cdot \frac{r_{id} R}{R + R_f}$$

$$R_{of} \approx \frac{r_o // (R + R_f)}{A_{od} \cdot \dfrac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f} \cdot \dfrac{R}{R + R_f}} \approx \frac{r_o // (R + R_f)}{A_{od}} \cdot \frac{r_{id} + R // R_f}{r_{id}} \cdot \frac{R + R_f}{R}$$

若 $r_{id} \gg R // R_f$，$r_o \ll (R + R_f)$，则

$$R_i \approx r_{id}$$

$$R_o \approx r_o$$

$$A \approx A_{od}$$

$$AF \approx A_{od} \cdot \frac{R}{R + R_f}$$

$$A_f \approx \frac{A_{od}}{1 + A_{od} \cdot \dfrac{R}{R + R_f}}$$

$$R_{if} \approx r_{id} \left(1 + A_{od} \cdot \frac{R}{R + R_f}\right) \approx \frac{A_{od} r_{id} R}{R + R_f}$$

$$R_{of} \approx \frac{r_o}{1 + A_{od} \cdot \dfrac{R}{R + R_f}} \approx \frac{r_o}{A_{od}} \cdot \frac{R + R_f}{R}$$

(a)　　(b)

图 7.33　题(19)图

第8章

信号运算电路



学习目的与要求

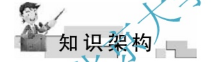
(1) 熟悉运放的两个工作区域(线性区和非线性区)，熟练判别运放工作在哪个区域。

(2) 了解理想运算放大电路的理想化参数。

(3) 熟练掌握比例运算、和差运算、积分运算、微分运算电路的工作原理及运算关系。

(4) 理解运用“虚断”和“虚短”概念分析计算输入输出关系。

(5) 掌握利用集成运算放大器电路的设计。



知识架构

- 集成运算放大器
- 理想运算放大器
- 基本线性运算电路
  - 同相放大器
  - 反相放大器
- 运算放大器其他应用电路
  - 求差电路
  - 仪用放大器
  - 求和电路
  - 积分和微分电路



难点

(1)“虚断”和“虚短”概念。

(2) 集成运算放大器线性应用电路。

(3) 各种基本运算电路组合成的复杂运算电路的分析与计算。





(1) 深刻理解基本运算电路的组成原理。
(2) 掌握基本运算、放大电路的分析方法。
(3) 掌握集成运算放大器电路的设计。

8.1 知识要点

8.1.1 理想运算放大器

(1) $A_{uo}\to\infty$，$r_i\to\infty$，$r_o\to 0$。
(2) 非线性区：$u_p>u_n$ 时，$+U_{om}=U_o$；$u_p<u_n$ 时，$-U_{om}=U_o$。
(3) 线性区：$u_p\approx u_n$，虚短，$i_p\approx i_n\approx 0$，虚断。

8.1.2 基本线性运放电路

1. 同相放大电路

同相输入电路如图 8.1 所示。
(1) 反馈类型：电压串联负反馈放大电路。

$u_i=u_p=u_n$，$i_f=i_1=\dfrac{u_i}{R_1}$，$u_o=(R_1+R_f)i_f=\left(1+\dfrac{R_f}{R_1}\right)u_i$，$R_i\to\infty$，$R_o\to 0$。

(2) 特点：$u_i=u_p=u_n$，运放存在共模输入信号，要求运放有较高的共模抑制比。
(3) 特殊应用：电压跟随器。

2. 反相放大电路

反相放大电路如图 8.2 所示。

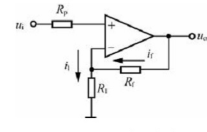


图 8.1 同相输入电路

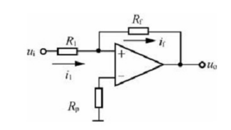


图 8.2 反相放大电路

(1) 反馈类型：电压并联负反馈放大电路。



$u_p=u_n=0$ 虚地，$i_f=i_1=\frac{u_i}{R_1}$，$u_o=-R_f i_f=-\frac{R_f}{R_1}u_i$，$R_i=R_1$，$R_o\to 0$。

(2) 特点：$u_p=u_n=0$，运放两个输入端没有共模输入信号，对运放的共模抑制比没有特殊要求。

3. 求差电路

(1) 差分式减法电路，如图 8.3 所示。

$u_o=\left(1+\frac{R_4}{R_1}\right)\frac{R_3}{R_2+R_3}u_{i2}-\frac{R_4}{R_1}u_{i1}$，若取$\frac{R_3}{R_2}=\frac{R_4}{R_1}$，则 $u_o=\frac{R_4}{R_1}(u_{i2}-u_{i1})$。

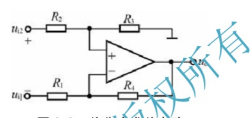


图 8.3 差分式求差电路

(2) 反相求和式减法电路，如图 8.4 所示。

$u_{o1}=-\frac{R_{f1}}{R_1}u_{i1}$，若 $R_{f1}=R_1$，则 $u_{o1}=-u_{i1}$，$u_o=-\frac{R_{f2}}{R_2}(u_{o1}+u_{i2})=\frac{R_{f2}}{R_2}(u_{i1}-u_{i2})$

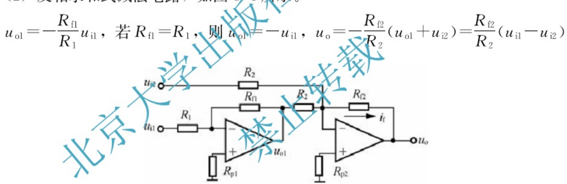


图 8.4 反相求和式减法电路

4. 仪用放大器

仪用放大器是由运放 A_1、A_2按同向输入接法组成第一级电路，运放 A_3组成第二级差分放大电路，如图 8.5 所示。在第一级电路中，u_{s1}、u_{s2}分别加到 A_1和 A_2的同相端，R_1

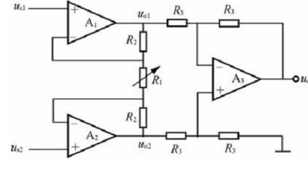


图 8.5 仪用放大器

和两个 R_2 组成的反馈网络，引入了负反馈，两运放 A_1、A_2 的两输入端形成虚短和虚断，因而有 $u_{R1}=u_{s1}-u_{s2}$ 和 $u_{R1}/R_1=(u_{o1}-u_{o2})/(2R_2+R_1)$，故得

$$u_{o1}-v_{o2}=\frac{2R_2+R_1}{R_1}u_{R1}=(1+\frac{2R_2}{R_1})(u_{s1}-u_{s2})$$

根据差分电路的运算关系可得

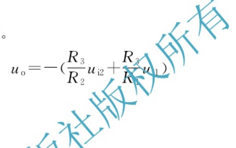
$$u_o=u_{o2}-u_{o1}=-(1+\frac{2R_2}{R_1})(u_{s1}-u_{s2})$$

于是得到电路增益为 $A_u=-(1+\dfrac{2R_2}{R_1})$。

5. 求和电路

反相加法电路如图 8.6 所示。

$$u_o=-(\frac{R_3}{R_2}u_{i2}+\frac{R_3}{R_1}u_{i1})$$



6. 积分和微分电路

1）积分电路

积分电路如图 8.7 所示。

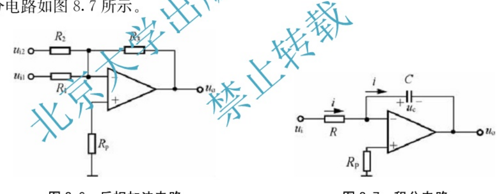


图 8.6　反相加法电路

图 8.7　积分电路

$i=\dfrac{u_i}{R}$，$u_o=-u_c=-\dfrac{1}{C}\int\dfrac{u_i}{R}\mathrm{d}t=-\dfrac{1}{RC}\int u_i\mathrm{d}t$ 。

假设输入信号 u_i 是阶跃信号，则输入波形如图 8.8(a)所示，且电容初始电压为零，则

$$u_o=-\frac{U_i}{RC}t$$

输出电压与时间呈线性关系，输出波形如图 8.8(b)所示。u_o 达到运放输出电压最大值 U_{om}，运放进入饱和状态，u_o 保持不变。

积分器可用作显示器的扫描电路或其可将方波转换为三角波等。

2）微分电路

微分电路如图 8.9 所示。

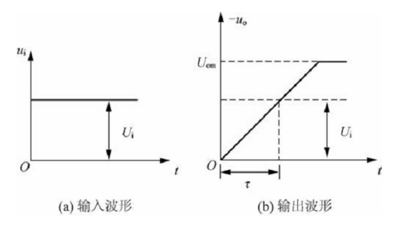


图 8.8 积分电路的输入输出波形

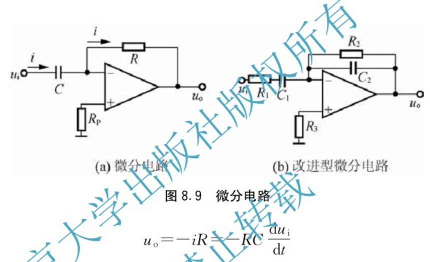


图 8.9 微分电路

$$u_o = -iR = -RC\frac{du_i}{dt}$$

输入电压为阶跃信号时，波形如图 8.10(a)所示，考虑到信号源总存在内阻，故在 $t=0$ 时，输出电压仍为一个有限值。随着电容器充电过程的进行，输出电压将逐渐地衰减，最后趋近于零，波形如图 8.10(b)所示。

当输入电压为 $u_i = \sin\omega t$ 时，输出电压 $u_o = -RC\omega\cos\omega t$。输出幅度将随频率的增加而线性地增加。说明微分电路对高频噪声特别敏感，故其抗干扰能力差。

改进型的微分电路：R_1 起限流作用，R_2 和 C_2 并联起相位补偿作用。

应用：自动控制系统 PID 调节器。

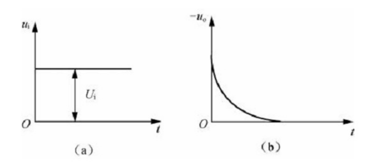


图 8.10 微分电路波形

8.2 典型例题分析

例题 1：设图 8.11 中的运放为理想器件，求出图(a)、(b)、(c)、(d)中电路输出电压 v_o的值。

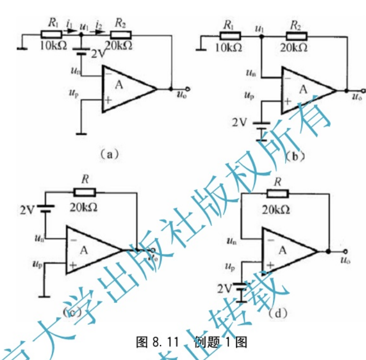


图 8.11 例题 1 图

解：利用虚短和虚断的概念：$u_n=u_p$，$i_n=i_p=0$。

图 8.11(a)可知：$i_1=i_2$，$\dfrac{0-u_1}{R_1}=\dfrac{u_1-u_o}{R_2}$，$u_p=0V$，

式中：$u_1=2V$，则 $u_o=6V$。

图 8.11(b)可知：$u_o=(1+\dfrac{R_2}{R_1})u_p$

式中：$u_p=2V$，则 $u_o=6V$。

图 8.11(c)可知：$u_n=u_p=0$，则 $u_o=2V$。

图 8.11(d)可知：$u_n=u_p=2V$，则 $u_o=2V$。

例题 2：一高输入电阻的桥式放大电路如图 8.12 所示，试写出 $u_o=f(\delta)$的表达式($\delta=\Delta R/R$)。

解：因 A_1、A_2为电压跟随器，故有

$$u_{o1}=u_A=\frac{u_i}{2},\quad u_{o2}=u_B=\frac{R}{2R+\delta R}u_i=\frac{1}{2+\delta}u_i$$

u_{o1}、u_{o2}为差分式运算电路 A_3的输入信号电压，即有

$$u_o=-\frac{R_2}{R_1}u_{o1}+(1+\frac{R_2}{R_1})(\frac{R_2}{R_1+R_2})u_{o2}=\frac{R_2}{R_1}(\frac{-\delta}{4+2\delta})u_i$$

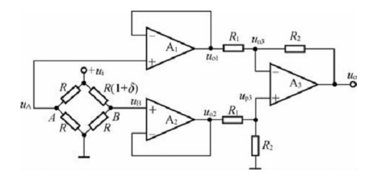


图 8.12　高输入电阻的桥式放大电路

例题 3：图 8.13 为增益线性调节运放电路，求该电路的电压增益 $A_u=u_o/(u_{i1}-u_{i2})$ 的表达式。

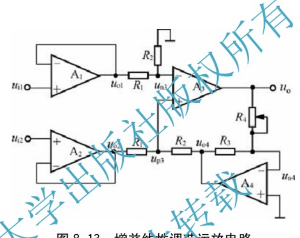


图 8.13　增益线性调节运放电路

解：A_1、A_2 是电压跟随器，有 $u_{o1}=u_{i1}$，$u_{o2}=u_{i2}$，利用虚短和虚断概念，有

$$\begin{cases}\dfrac{u_{o1}-u_{n3}}{R_1}=\dfrac{u_{n3}}{R_2}\\ \dfrac{u_{o2}-u_{p3}}{R_1}=\dfrac{u_{p3}-u_{o4}}{R_2}\\ u_{o4}=-\dfrac{R_3}{R_4}u_o\\ u_{n3}=u_{p3}\end{cases}$$

将上述方程组联立求解，得

$$R_2u_{o1}-R_2u_{o2}=-\left(\frac{R_1R_3}{R_4}\right)u_o$$

故

$$A_u=u_o/(u_{i1}-u_{i2})=-\frac{R_1R_3}{R_2R_4}u_o$$

例题 4：同相输入加法电路如图 8.14(a)、(b)所示。

(1) 求图(a)中输出电压 u_o 表达式。当 $R_1=R_2=R_3=R_4$ 时，$u_o=?$

(2) 求图(b)中输出电压的表达式，当 $R_1=R_2=R_3$ 时，$u_o=?$

解：(1) 输出电压为

$$u_o=(1+\frac{R_4}{R_3})u_p$$

式中：$u_p=\frac{R_2}{R_1+R_2}u_{i1}+\frac{R_1}{R_1+R_2}u_{i2}$，

即

$$u_o=(1+\frac{R_4}{R_3})(\frac{1}{R_1+R_2})(R_2u_{i1}+R_1u_{i2})$$

若 $R_1=R_2=R_3=R_4$，则 $u_o=u_{i1}+u_{i2}$。

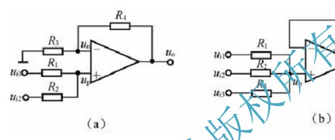


图 8.14 同相输入加法电路图

(2) 输出电压为

$$u_o=u_p$$

式中：$u_p=\frac{R_2R_3}{R_1R_2+R_1R_3+R_2R_3}u_{i1}+\frac{R_1R_3}{R_1R_2+R_1R_3+R_2R_3}u_{i2}+\frac{R_1R_2}{R_1R_2+R_1R_3+R_2R_3}u_{i3}$，

即

$$u_o=\frac{R_2R_3}{R_1R_2+R_1R_3+R_2R_3}u_{i1}+\frac{R_1R_3}{R_1R_2+R_1R_3+R_2R_3}u_{i2}+\frac{R_1R_2}{R_1R_2+R_1R_3+R_2R_3}u_{i3}$$

若 $R_1=R_2=R_3$，则 $u_o=\frac{1}{3}(u_{i1}+u_{i2}+u_{i3})$。

例题 5：加减运算电路如图 8.15 所示，求输出电压 u_o的表达式。

解：方法一：应用虚短概念和叠加定理。

令 $u_{i3}=u_{i4}=0$，则 $u_o'=-\frac{R_6}{R_1}u_{i1}-\frac{R_6}{R_2}u_{i2}=-\frac{5}{4}u_{i1}-2u_{i2}$。

再令 $u_{i1}=u_{i2}=0$，则 $u_p=\frac{R_4/\!/R_5}{R_3+R_4/\!/R_5}u_{i3}+\frac{R_3/\!/R_5}{R_4+R_3/\!/R_5}u_{i4}=\frac{6}{11}u_{i3}+\frac{3}{11}u_{i4}$。

$$u_o''=\left(1+\frac{R_6}{R_1/\!/R_2}\right)u_p\approx\frac{51}{22}u_{i3}+\frac{51}{44}u_{i4}$$

将 u_o'与 u_o''叠加得输出电压为

$$u_o=u_o'+u_o''=-\frac{5}{4}u_{i1}-2u_{i2}+\frac{51}{22}u_{i3}+\frac{51}{44}u_{i4}$$

方法二：利用虚断列节点方程。

$$\frac{u_{i1}-u_n}{R_1}+\frac{u_{i2}-u_n}{R_2}=\frac{u_n-u_o}{R_6}$$

$$\frac{u_{i3}-u_p}{R_3}+\frac{u_{i4}-u_p}{R_4}=\frac{u_p}{R_5}$$

令 $u_p=u_n$，联立求解上述方程，结果与方法一同。

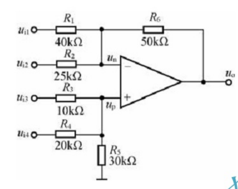


图 8.15　加减运算电路图

例题 6：电路如图 8.16 所示，设运放是理想的，试求 u_{o1}、u_{o2} 及 u_o 的值。

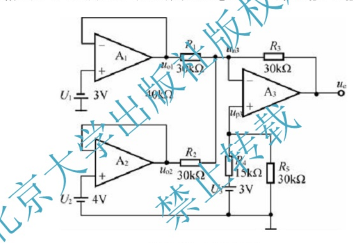


图 8.16　例题 6 图

解：由于 A_1、A_2 组成电压跟随电路，所以 $u_{o1}=U_1=-3V$，$u_{o2}=U_2=4V$。

A_3 组成加减电路，利用叠加原理，当 $U_3=0$，反相加法时，A_3 的输出电压为

$$u_o'=-\frac{R_3}{R_1}u_{o1}-\frac{R_3}{R_2}u_{o2}=-1V$$

当 $u_{o1}=0$，$u_{o2}=0$，$U_3=+3V$ 时，A_3 的输出电压为

$$u_o''=\left(1+\frac{R_3}{R_1/\!/R_2}\right)u_p$$

式中：$u_p=\frac{R_5}{R_4+R_5}U_3=2V$。

即

$$u_o''=\left(1+\frac{R_3}{R_1/\!/R_2}\right)\frac{R_5}{R_4+R_5}U_3=6V$$

u_o' 与 u_o'' 叠加得输出电压为

$$u_o=u_o'+u_o''=5V$$

例题 7：积分电路如图 8.17(a)所示，设运放是理想的，已知初始态时 $u_C(0)=0V$，试回答下列问题：①当 $R=100k\Omega$，$C=2\mu F$ 时，若突然加入 $u_i(t)=1V$ 的阶跃电压，求 1s 后输出电压 u_o 的值；②当 $R=100k\Omega$，$C=0.47\mu F$，输入电压波形如图 8.17(b)所示，试画出 u_o 的波形，并标出 u_o 的幅值和回零时间。

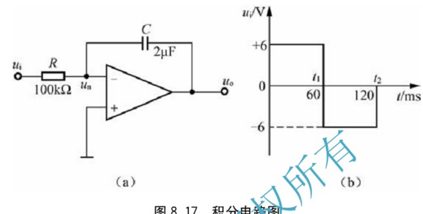


图 8.17　积分电路图

解：(1) 当输入电压为 $u_i(t)=1V$ 的阶跃电压，$t=1s$ 时，输出电压 u_o 波形如图 8.18(a)所示，其 u_o 的幅值为 $u_o=-\frac{u_i t}{RC}=-5V$。

(2) $R=100k\Omega$，$C=0.47\mu F$ 时，如图 8.17(b)所示，u_o 波形如图 8.18(b)所示，当 $t_1=60ms$ 时，其 u_o 的幅值为 $u_o(60)=-\frac{u_i t_1}{RC}=-7.66V$。

而当 $t_1=120ms$ 时，其 u_o 的幅值为

$$u_o(120)=u_o(60)-\left[\frac{-6}{100\times10^3\times0.47\times10^6}(120-60)\times10^{-3}V\right]=0V$$

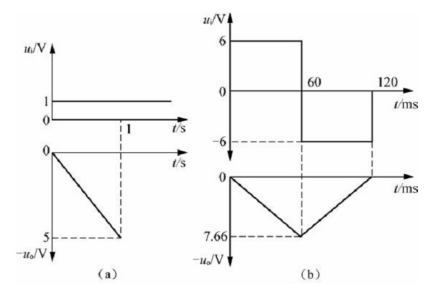


图 8.18　例题 7 图

例题 8：电路如图 8.19 所示，A_1、A_2 为理想运放，电容器 C 的初始电压 $u_C(0)=0V$。

①写出 u_o 与 u_{i1}、u_{i2} 和 u_{i3} 之间的关系式；②当电路中电阻 $R_1=R_2=R_3=R_4=R_5=R_6=R$ 时，求输出电压 u_o 的表达式。

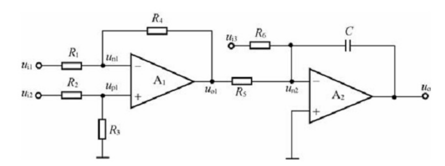


图 8.19　例题 8 图

解： ① A_1 组成差分式运算电路，A_2 组成积分电路。A_1 的输出电压为

$u_{o1}=(\frac{R_3}{R_2+R_3})(1+\frac{R_4}{R_1})u_{i2}-\frac{R_4}{R_1}u_{i1}$，$A_2$ 的输出电压为 $u_o=-\frac{1}{C}\int_0^t(\frac{u_{o1}}{R_5}+\frac{u_{i3}}{R_6})\mathrm{d}t$ 。

② 当 $R_1=R_2=R_3=R_4=R_5=R_6=R$ 时，$u_{o1}=u_{i2}-u_{i1}$，$u_o=-\frac{1}{RC}\int_0^t[(u_{i2}-u_{i1})+u_{i3}]\mathrm{d}t$

例题 9：微分电路如图 8.20(a)所示，输入电压 u_i 如图 8.20(b)所示，设电路 $R=10\text{k}\Omega$，$C=100\mu\text{F}$，并设运放是理想的，试画出输出电压 u_o 的波形，并标出 u_o 的幅值。

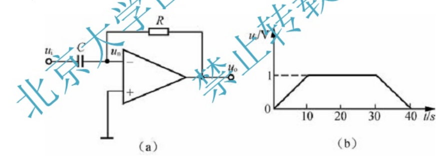


图 8.20　微分电路图

解： 当 $t=0\sim10\text{s}$ 时，$\frac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{10}$，$u_o$ 的幅值为

$$u_o=-RC\frac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t}=\left[-(10\times10^3\times100\times10^{-6})\frac{1}{10}\text{V}\right]=-0.1\text{V}。$$

当 $t=10\sim30\text{s}$ 时，$\frac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t}=0$，故 $u_o=0$。

当 $t=30\sim40\text{s}$ 时，$\frac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t}=-\frac{1}{10}$，$u_o$ 的幅值为

$$u_o=-RC\frac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t}=\left[-(10\times10^3\times100\times10^{-6})\left(-\frac{1}{10}\right)\text{V}\right]=0.1\text{V}。$$

其输出电压 u_o 的波形如图 8.21 所示。

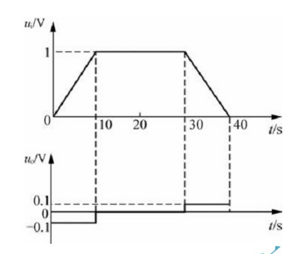


图 8.21　输入电压的波形

例题 10：电路如图 8.22(a)所示。设运放是理想的，电容器 C 上的初始电压为零，即 $u_C(0)=0\text{V}$。$u_{i1}=-0.1\text{V}$，u_{i2}幅值为±3V，且为周期 $T=2\text{s}$ 的矩形波。

（1）求出 u_{o1}、u_{o2}和 u_o 的表达式。

（2）当输入电压 u_{i1}、u_{i2}如图 8.22(b)所示时，画出 u_o 的波形。

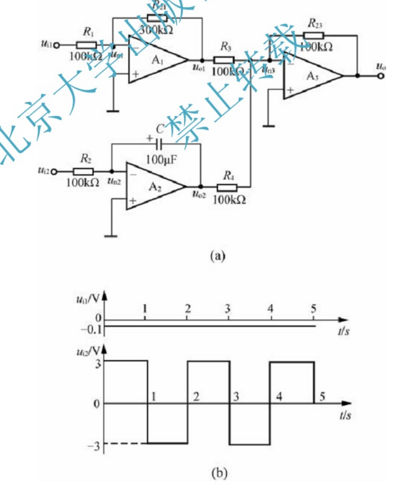


图 8.22　例题 10 图

（a）电路；（b）输入电压 u_{i1}、u_{i2}的波形图

解：（1）u_{o1}、u_{o2}和u_o的表达式。

由图可看出，A_1、A_2、A_3分别组成反相比例运算电路、反相积分电路和反相求和电路，因此有

$$u_{o1}=-\frac{R_{21}}{R_1}u_{i1}=0.3\text{V}，u_{o2}=-\frac{1}{R_2C}\int_0^t u_{i2}\mathrm{d}t，u_o=-\left(\frac{R_{23}}{R_3}u_{o1}+\frac{R_{23}}{R_4}u_{o2}\right)$$

将给定的参数代入上式得，$\tau=R_2C=10\text{s}$，$u_{o2}=-\frac{1}{10}\int_0^t u_{i2}\mathrm{d}t$，$u_o=-\left(\frac{R_{23}}{R_3}u_{o1}+\frac{R_{23}}{R_4}u_{o2}\right)=$

$$-\frac{100}{100}u_{o1}+\frac{1}{10}\int_0^t u_{i2}\mathrm{d}t=-0.3+\frac{1}{10}\int_0^t u_{i2}\mathrm{d}t。$$

（2）画出u_o波形。

当$t=0$时，$u_C(0)=0\text{V}$，$u_{i1}=-0.1\text{V}$，$u_{o1}=0.3\text{V}$，$u_{o2}=0\text{V}$，则有

$u_o=-0.3\text{V}$。

当$t=1\text{s}$时，$u_{o1}=0.3\text{V}$，$u_{o2}=\frac{-3}{10}\times1\text{V}=-0.3\text{V}$，则有

$u_o=\left(-0.3+\frac{3}{10}\times1\right)\text{V}=0$。

当$t=2\text{s}$时，$u_{i1}=-0.1\text{V}$，u_{i2}由$+3\text{V}$变到-3V，输出电压为

$$u_o=3u_{i1}-\left(-\frac{1}{\tau}\int_0^1 u_{i2}\mathrm{d}t-\frac{1}{\tau}\int_1^2 u_{i2}\mathrm{d}t\right)=-0.3\text{V}-\left[\left(\frac{3\times1}{10}-\frac{-3\times(2-1)}{10}\right)\text{V}\right]=-0.3\text{V}。$$

由以上结果可以画出u_o波形，如图 8.23 所示。

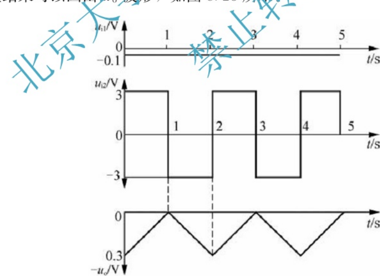


图 8.23　电压波形图

8.3　自　测　题

自测题一：判断下列说法是否正确。

（1）运算电路中一般均引入负反馈。 （　　）

（2）在运算电路中，集成运放的反相输入端均为虚地。 （　　）

（3）凡是运算电路都可利用“虚短”和“虚断”的概念求解运算关系。 （　　）

（4）各种滤波电路的通带放大倍数的数值均大于1。 （　　）

解：（1）√　（2）×　（3）√　（4）×

自测题二：选择或填写正确答案。

（1）现有电路如下所述。

A. 反相比例运算电路　　B. 同相比例运算电路

C. 积分运算电路　　D. 微分运算电路

E. 加法运算电路　　F. 乘方运算电路

选择一个合适的答案填入空内。

① 欲将正弦波电压移相+90°，应选用________。

② 欲将正弦波电压转换成二倍频电压，应选用________。

③ 欲将正弦波电压叠加上一个直流量，应选用________。

④ 欲实现 $A_u=-100$ 的放大电路，应选用________。

⑤ 欲将方波电压转换成三角波电压，应选用________。

⑥ 欲将方波电压转换成尖顶波电压，应选用________。

解：①C　②F　③E　④A　⑤C　⑥D

（2）分别选择“反相”或“同相”填入下列各空内。

① ________比例运算电路中集成运放反相输入端为虚地，而________比例运算电路中集成运放两个输入端的电位等于输入电压。

② ________比例运算电路的输入电阻大，而________比例运算电路的输入电阻小。

③ ________比例运算电路的输入电流等于零，而________比例运算电路的输入电流等于流过反馈电阻中的电流。

④ ________比例运算电路的比例系数大于1，________比例运算电路的比例系数小于零。

解：①反相，同相　②同相，反相　③同相，反相　④同相，反相

（3）填空。

① ________运算电路可实现 $A_u>1$ 的放大器。

② ________运算电路可实现 $A_u<0$ 的放大器。

③ ________运算电路可将三角波电压转换成方波电压。

④ ________运算电路可实现函数 $Y=aX_1+bX_2+cX_3$，a、b 和 c 均大于零。

⑤ ________运算电路可实现函数 $Y=aX_1+bX_2+cX_3$，a、b 和 c 均小于零。

⑥ ________运算电路可实现函数 $Y=aX^2$。

解：①同相比例　②反相比例　③微分　④同相求和　⑤反相求和　⑥乘方

自测题三：分析计算题。

（1）已知图 8.24 所示各电路中的集成运放均为理想运放，模拟乘法器的乘积系数 k 大于零。试分别求解各电路的运算关系。

解： 图 8.24(a)所示电路为求和运算电路，图 8.24(b)所示电路为开方运算电路。它们的运算表达式分别为

图 8.24(a) $u_{o1} = -R_f\left(\dfrac{u_{i1}}{R_1} + \dfrac{u_{i2}}{R_2}\right) + \left(1 + \dfrac{R_f}{R_1 /\!/ R_2}\right) \cdot \dfrac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot u_{i3}$

$$u_o = -\frac{1}{RC}\int u_{o1}\,dt$$

图 8.24(b) $u_{o2} = -\dfrac{R_2}{R_1}u_i = -\dfrac{R_3}{R_4}u'_o = -\dfrac{R_3}{R_4} \cdot ku_o^2$

$$u_o = \sqrt{\frac{R_2 R_4}{kR_1 R_3} \cdot u_i}$$

图 8.24 题(1)图

（2）电路如图 8.25 所示，集成运放输出电压的最大幅值为±14V，填表。

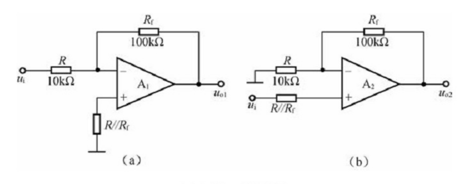


图 8.25 题(2)图

u_i/V	0.1	0.5	1.0	1.5
u_{o1}/V				
u_{o2}/V				

解： $u_{o1}=(-R_f/R)\ u_i=-10u_i$，$u_{o2}=(1+R_f/R)\ u_i=11u_i$。当集成运放工作到非线性区时，输出电压不是+14V，就是−14V。

u_i/V	0.1	0.5	1.0	1.5
u_{o1}/V	−1	−5	−10	−14
u_{o2}/V	1.1	5.5	11	14

(3) 设计一个比例运算电路，要求输入电阻 $R_i=20\text{k}\Omega$，比例系数为−100。

解： 可采用反相比例运算电路，电路形式如图 8.25(a)所示。$R=20\text{k}\Omega$，$R_f=2\text{M}\Omega$。

(4) 电路如图 8.26 所示，试求：①输入电阻；②比例系数。

解： 由图可知 $R_i=50\text{k}\Omega$，$u_M=-2u_i$。

$$i_{R2}=i_{R4}+i_{R3}$$

即

$$-\frac{u_M}{R_2}=\frac{u_M}{R_4}+\frac{u_M-u_o}{R_3}$$

输出电压

$$u_o=52u_M=-104u_i$$

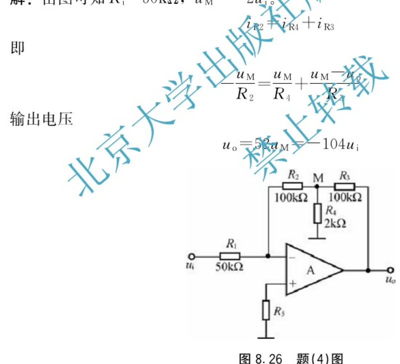


图 8.26 题(4)图

(5) 电路如图 8.26 所示，集成运放输出的电压是最大幅值为±14V、u_i为 2V 的直流信号。分别求出下列各种情况下的输出电压。

①R_2短路；②R_3短路；③R_4短路；④R_4断路。

解： ① $u_o=-\dfrac{R_3}{R_1}=-2u_i=-4\text{V}$。

② $u_o=-\dfrac{R_2}{R_1}=-2u_o=-4\text{V}$。

③ 电路无反馈，$u_o = -14\text{V}$。

④ $u_o = -\dfrac{R_2 + R_3}{R_1} = -4u_i = -8\text{V}$。

(6) 电路如图 8.27 所示，T_1、T_2和 T_3的特性完全相同，填空。

① $I_1 \approx$________ mA，$I_2 \approx$________ mA。

② 若 $I_3 \approx 0.2\text{mA}$，则 $R_3 \approx$________ kΩ。

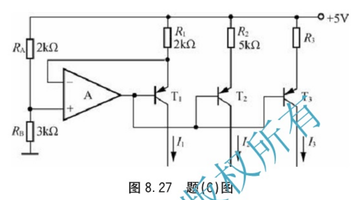


图 8.27　题(6)图

解： ①1，0.4。②10。

(7) 试求图 8.28 所示各电路输出电压与输入电压的运算关系式。

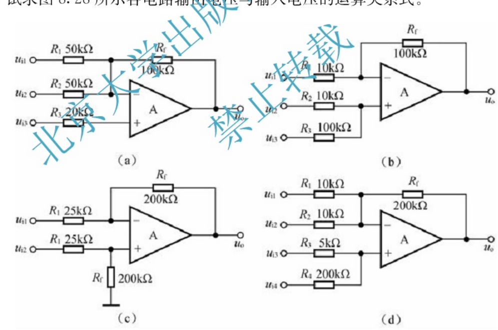


图 8.28　题(7)图

解： 在图示各电路中，集成运放的同相输入端和反相输入端所接总电阻均相等。各电路的运算关系式分析如下。

图 8.25 所示图(a) $u_o = -\dfrac{R_f}{R_1} \cdot u_{i1} - \dfrac{R_f}{R_2} \cdot u_{i2} + \dfrac{R_f}{R_3} \cdot u_{i3} = -2u_{i1} - 2u_{i2} + 5u_{i3}$

(b) $u_o = -\dfrac{R_f}{R_1} \cdot u_{i1} + \dfrac{R_f}{R_2} \cdot u_{i2} + \dfrac{R_f}{R_3} \cdot u_{i3} = -10u_{i1} + 10u_{i2} + u_{i3}$

(c)$u_o=\frac{R_f}{R_1}(u_{i2}-u_{i1})=8(u_{i2}-u_{i1})$

(d)$u_o=-\frac{R_f}{R_1}\cdot u_{i1}-\frac{R_f}{R_2}\cdot u_{i2}+\frac{R_f}{R_3}\cdot u_{i3}+\frac{R_f}{R_4}\cdot u_{i4}=-20u_{i1}-20u_{i2}+40u_{i3}+u_{i4}$

(8) 在图 8.28 所示各电路中，是否对集成运放的共模抑制比要求较高，为什么？

解： 因为均有共模输入信号，所以均要求用具有高共模抑制比的集成运放。

(9) 在图 8.28 所示各电路中，集成运放的共模信号分别为多少？要求写出表达式。

解： 因为集成运放同相输入端和反相输入端之间的净输入电压为零，所以它们的电位就是集成运放的共模输入电压。图示各电路中集成运放的共模信号分别为

图 8.28(a)$u_{iC}=u_{i3}$

图 8.28(b)$u_{iC}=\frac{R_3}{R_2+R_3}\cdot u_{i2}+\frac{R_2}{R_2+R_3}\cdot u_{i3}=\frac{10}{11}u_{i2}+\frac{1}{11}u_{i3}$

图 8.28(c)$u_{iC}=\frac{R_f}{R_1+R_f}\cdot u_{i2}=\frac{8}{9}u_{i2}$

图 8.28(d)$u_{iC}=\frac{R_4}{R_3+R_4}\cdot u_{i3}+\frac{R_3}{R_3+R_4}\cdot u_{i4}=\frac{40}{41}u_{i3}+\frac{1}{41}u_{i4}$

8.4 练　习　题

(1) 图 8.29 所示为恒流源电路，已知稳压管工作在稳压状态，试求负载电阻中的电流。

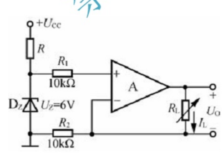


图 8.29　恒流源电路图

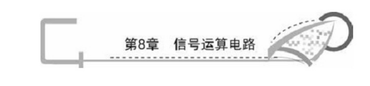
(2) 电路如图 8.30 所示。

① 写出 u_o与 u_{i1}、u_{i2}的运算关系式。

② 当 R_W的滑动端在最上端时，若 $u_{i1}=10\text{mV}$，$u_{i2}=20\text{mV}$，则 $u_o=?$

③ 若 u_o的最大幅值为±14V，输入电压最大值 $u_{i1max}=10\text{mV}$，$u_{i2max}=20\text{mV}$，最小值均为 0V，则为了保证集成运放工作在线性区，R_2的最大值为多少？

(3) 分别求解图 8.31 所示各电路的运算关系。



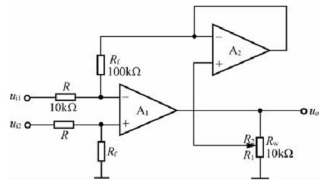


图 8.30 题(2)图

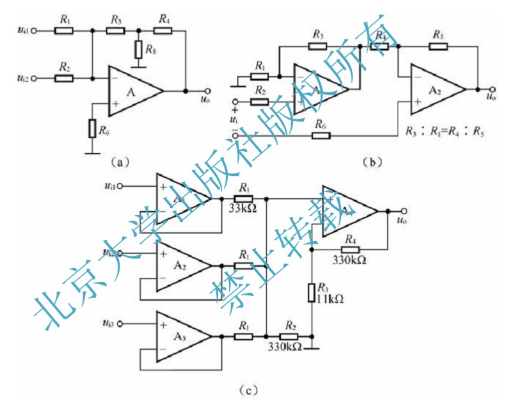


图 8.31 题(3)图

(4) 在图 8.32(a)所示电路中，已知输入电压 u_i的波形如图 8.32(b)所示，当 $t=0$ 时，$u_o=0$。试画出输出电压 u_o的波形。

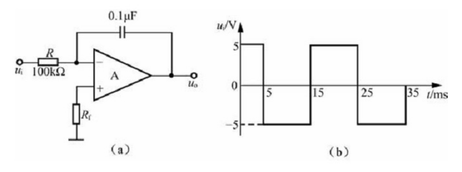


图 8.32 题(4)图

(5) 已知图 8.33 所示电路的输入电压 u_i的波形如图 8.32(b)所示，且当 $t=0$ 时，$u_o=0$。试画出输出电压 u_o的波形。

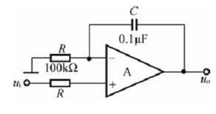


图 8.33　题(5)图

(6) 试分别求解图 8.34 所示各电路的运算关系。

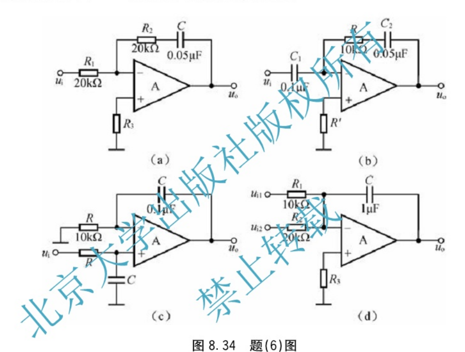


图 8.34　题(6)图

(7) 在图 8.35 所示电路中，已知 $R_1=R=R'=100\text{k}\Omega$，$R_2=R_f=100\text{k}\Omega$，$C=1\mu\text{F}$。

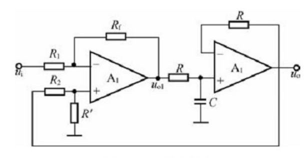


图 8.35　题(7)图

① 试求出 u_o与 u_i的运算关系。

② 设 $t=0$ 时 $u_o=0$，且 u_i由零跃变为-1V，试求输出电压由零上升到$+6\text{V}$ 所需要的时间。

(8) 试求出图 8.36 所示电路的运算关系。

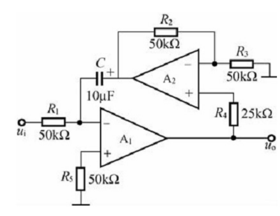


图 8.36 题(8)图

(9) 在图 8.37 所示电路中，已知 $u_{i1}=4V$，$u_{i2}=1V$。回答下列问题。

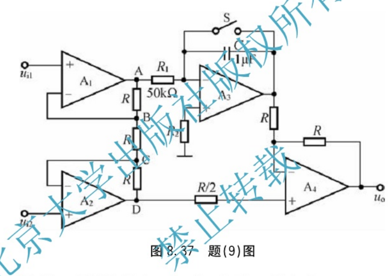


图 8.37 题(9)图

① 当开关 S 闭合时，分别求解 A、B、C、D 和 u_o的电位。

② 设 $t=0$ 时 S 打开，问经过多长时间 $u_o=0$?

(10) 画出利用对数运算、指数运算和加减运算电路实现除法运算的原理框图。

(11) 为了使图 8.38 所示电路实现除法运算，①标出集成运放的同相输入端和反相输入端；②求出 u_o和 u_{i1}、u_{i2}的运算关系式。

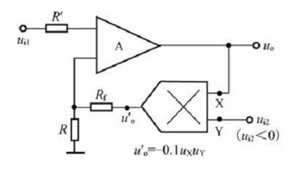


图 8.38 题(11)图

(12) 求出图 8.39 所示各电路的运算关系。

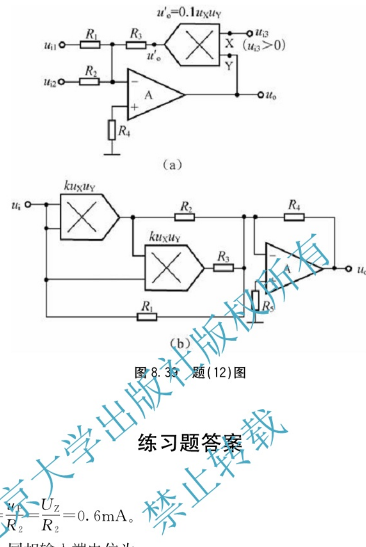


图 8.33 题(12)图

练习题答案

(1) 解：$I_L=\frac{u_P}{R_2}=\frac{U_Z}{R_2}=0.6\text{mA}$。

(2) 解：①A_2同相输入端电位为

$$u_{p2}=u_{n2}=\frac{R_f}{R}(u_{i2}-u_{i1})=10(u_{i2}-u_{i1})$$

输出电压为

$$u_o=(1+\frac{R_2}{R_1})\cdot u_{p2}=10(1+\frac{R_2}{R_1})(u_{i2}-u_{i1})\text{或}\ u_o=10\cdot\frac{R_W}{R_1}\cdot(u_{i2}-u_{i1})$$

② 将$u_{i1}=10\text{mV}$，$u_{i2}=20\text{mV}$代入上式，得$u_o=100\text{mV}$。

③ 根据题目所给参数，$(u_{i2}-u_{i1})$的最大值为20mV。若R_1为最小值，则为保证集成运放工作在线性区，$(u_{i2}-u_{i1})=20\text{mV}$时集成运放的输出电压应为+14V，写成表达式为

$$u_o=10\cdot\frac{R_W}{R_{1\min}}\cdot(u_{i2}-u_{i1})=10\cdot\frac{10}{R_{1\min}}\cdot 20=14$$

故$R_{1\min}\approx 143\Omega$，$R_{2\max}=R_W-R_{1\min}\approx(10-0.143)\text{k}\Omega\approx 9.86\text{k}\Omega$。

(3) 解：图8.31(a)所示为反相求和运算电路；图8.31(b)所示的电路中A_1组成同相比例运算电路，A_2组成加减运算电路；图8.31(c)所示的A_1、A_2、A_3均组成为电压跟随器电路，A_4组成反相求和运算电路。

图8.31(a)，设R_3、R_4、R_5的节点为M，则

$$u_M = -R_3(\frac{u_{i1}}{R_1}+\frac{u_{i2}}{R_2})$$

$$i_{R_4} = i_{R_3} - i_{R_5} = \frac{u_{i1}}{R_1}+\frac{u_{i2}}{R_2}-\frac{u_M}{R_5}$$

$$u_o = u_M - i_{R4}R_4 = -(R_3+R_4+\frac{R_3R_4}{R_5})(\frac{u_{i1}}{R_1}+\frac{u_{i2}}{R_2})$$

图 8.31(b)，先求解 u_{o1}，再求解 u_o。

$$u_{o1} = (1+\frac{R_3}{R_1})u_{i1}$$

$$\begin{aligned} u_o &= -\frac{R_5}{R_4}u_{o1}+(1+\frac{R_5}{R_4})u_{i2} \\ &= -\frac{R_5}{R_4}(1+\frac{R_3}{R_1})u_{i1}+(1+\frac{R_5}{R_4})u_{i2} \\ &= (1+\frac{R_5}{R_4})(u_{i2}-u_{i1}) \end{aligned}$$

图 8.31(c)，A_1、A_2、A_3的输入电压分别为 u_{i1}、u_{i2}、u_{i3}。由于在 A_4组成的反相求和运算电路中反相输入端和同相输入端外接电阻阻值相等，所以

$$u_o = \frac{R_4}{R_1}(u_{i1}+u_{i2}+u_{i3}) = 10(u_{i1}+u_{i2}+u_{i3})$$

(4) 解：输出电压的表达式为

$$u_o = -\frac{1}{RC}\int_{t1}^{t2} u_i \mathrm{d}t + u_o(t_1)$$

当 u_i为常量时

$$\begin{aligned} u_o &= -\frac{1}{RC}u_i(t_2-t_1)+u_o(t_1) \\ &= -\frac{1}{10^5 \times 10^{-7}}u_i(t_2-t_1)+u_o(t_1) \\ &= -100u_i(t_2-t_1)+u_o(t_1) \end{aligned}$$

若 $t=0$ 时 $u_o=0$，则 $t=5$ms 时

$u_o = -100 \times 5 \times 5 \times 10^{-3}V=-2.5$V。

当 $t=15$ms 时

$u_o = [-100 \times (-5) \times 10 \times 10^{-3} + (-2.5)]$ V$=2.5$V。

因此输出波形如图 8.40 所示。

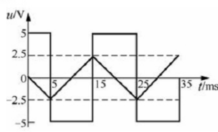


图 8.40 输出波形图

(5) 解：输出电压与输入电压的运算关系为 $u_o = 100u_i(t_2 - t_1) + u_i - u_c(t_1)$，波形如图 8.41 所示。

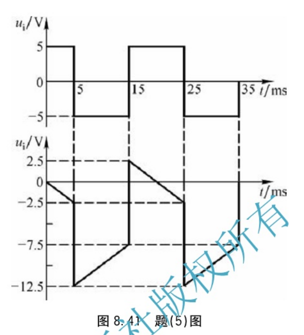


图 8.41 题(5)图

(6) 解：利用节点电流法，可解出各电路的运算关系分别为

图 8.34(a)，$u_o = -\dfrac{R_2}{R_1}u_i - \dfrac{1}{R_1C}\int u_i \mathrm{d}t = -u_i - 100\int u_i \mathrm{d}t$ 。

图 8.34(b)，$u_o = -RC_1\dfrac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t} - \dfrac{C_1}{C_2}u_i = -10^{-3}\dfrac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t} - 2u_i$ 。

图 8.34(c)，$u_o = \dfrac{1}{RC}\int u_i \mathrm{d}t = 10^3\int u_i \mathrm{d}t$ 。

图 8.34(d)，$u_o = -\dfrac{1}{C}\int(\dfrac{u_{i1}}{R_1} + \dfrac{u_{i2}}{R_2})\mathrm{d}t = -100\int(u_{i1} + 0.5u_{i2})\mathrm{d}t$ 。

(7) 解：①因为 A_1 的同相输入端和反相输入端所接电阻相等，电容上的电压 $u_C = u_o$，所以其输出电压为

$$u_{o1} = -\frac{R_f}{R_1}\cdot u_i + \frac{R_f}{R_2}\cdot u_o = u_o - u_i$$

电容的电流为

$$i_C = \frac{u_{o1} - u_o}{R} = -\frac{u_i}{R}$$

因此，输出电压为

$$u_o = \frac{1}{C}\int i_C \mathrm{d}t = -\frac{1}{RC}\int u_i \mathrm{d}t = -10\int u_i \mathrm{d}t$$

② $u_o = -10u_it_1 = [-10\times(-1)\times t_1]\ \mathrm{V} = 6\mathrm{V}$，故 $t_1 = 0.6\mathrm{s}$。即经 0.6 秒输出电压是 6V。

(8) 解：设 A_2 的输出电压为 u_{o2}。因为 R_1 的电流等于 C 的电流，又因为 A_2 组成以 u_o

为输入的同相比例运算电路，所以

$$u_{o2}=-\frac{1}{R_1C}\int u_i\mathrm{d}t=-2\int u_i\mathrm{d}t$$

$$u_{o2}=(1+\frac{R_2}{R_3})u_o=2u_o$$

$$u_o=-\int u_i\mathrm{d}t$$

(9) 解：① $U_A=7V$，$U_B=4V$，$U_C=1V$，$U_D=-2V$，$u_o=2U_D=-4V$。

② 因为 $u_o=2u_D-u_{o3}$，$2u_D=-4V$，所以 $u_{o3}=-4V$ 时，u_o才为零。即

$$u_{o3}=-\frac{1}{R_1C}\cdot u_A\cdot t=-\frac{1}{50\times10^3\times10^{-6}}\times7\times t=-4V$$

$$t\approx28.6\mathrm{ms}$$

(10) 解：答案如图 8.42 所示。

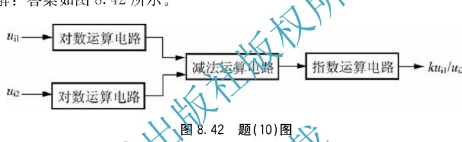


图 8.42 题(10)图

(11) 解：①为了保证电路引入负反馈，A 的上端为“－”，下端为“＋”。

② 根据模拟乘法器输出电压和输入电压的关系和节点电流关系，可得

$$u_o'=ku_ou_{i2}$$

$$u_{i1}=\frac{R}{R+R_f}u_o'$$

$$=\frac{R}{R+R_f}\cdot(-0.1u_ou_{i2})$$

所以

$$u_o=-\frac{10(R+R_f)}{R}\cdot\frac{u_{i1}}{u_{i2}}$$

(12) 解：电路如图 8.39(a)实现求和、除法运算，电路如图 8.39(b)实现一元三次方程。它们的运算关系式分别为

图 8.39(a)，

$$u_o'=-R_3(\frac{u_{i1}}{R_1}+\frac{u_{i2}}{R_2})=ku_ou_{i3}$$

$$u_o=-\frac{R_3}{ku_{i3}}(\frac{u_{i1}}{R_1}+\frac{u_{i2}}{R_2})$$

图 8.39(b)，

$$u_o=-\frac{R_4}{R_2}ku_i^2-\frac{R_4}{R_3}k^2u_i^3-\frac{R_4}{R_1}u_i$$

第 9 章

信号处理与信号产生电路

学习目的与要求

(1) 掌握有源低通、高通、带通、带阻滤波器的概念。

(2) 理解正弦波发生电路的组成：放大电路，正反馈网络，选频网络，稳幅电路。

(3) 掌握起振条件与平衡条件的关系。

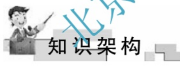
(4) 掌握 RC 振荡器电路结构、起振条件、稳幅措施。

(5) 掌握利用相位平衡条件判断能否起振的方法。

(6) 了解石英晶体振荡器的概念。

(7) 了解矩形波信号发生器、三角波发生器的原理。

(8) 熟练掌握比较器工作原理，正确理解阈值电平。



知识架构

- 有源滤波电路基本概念
  - 一阶低通滤波电路(LPF)
  - 一阶高通滤波电路(HPF)
  - 带通滤波电路和带阻滤波电路
- 正弦波振荡电路
  - 正弦波振荡电路的基本概念
  - *RC* 正弦波振荡电路
  - *LC* 正弦波振荡电路
    - 变压器式 *LC* 振荡器
    - 三点式 *LC* 振荡器
  - 石英晶体振荡电路
- 非正弦信号发生电路
  - 电压比较器
  - 方波发生电路
  - 8038 集成函数波形发生器





（1）一阶和二阶有源滤波电路的工作原理。

（2）*RC* 正弦波振荡电路的工作原理和振荡频率的计算。

（3）*LC* 正弦波振荡电路的工作原理和振荡条件的判定、振荡频率的计算。



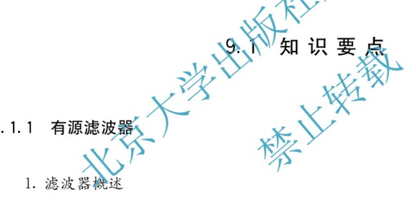
（1）有源滤波电路的基本概念及定义，一阶和二阶有源滤波电路的工作原理。

（2）正弦波振荡电路的基本概念和振荡条件。

（3）*RC* 正弦波振荡电路的工作原理和振荡频率的计算。

（4）*LC* 正弦波振荡电路的工作原理和振荡条件的判定。

（5）利用相位平衡条件判断能否起振，并计算振荡频率。



9.1　知识要点

9.1.1　有源滤波器

1. 滤波器概述

滤波电路是一种能让需要频段的信号顺利通过，而对其他频段信号起抑制作用的电路。在这种电路中，把能顺利通过的频率范围，称为“通频带”或“通带”；反之，受到衰减或完全被抑制的频率范围，称为“阻带”；两者之间幅频特性发生变化的频率范围，称为“过渡带”。滤波电路的幅频特性如图 9.1 所示。

2. 滤波电路的分类

（1）按照幅频特性的不同，可分为以下几种。

① 低通滤波电路(LPF)，它允许信号中的直流和低频分量通过，而抑制高频分量。幅频曲线如图 9.1(a)所示。

② 高通滤波电路(HPF)，它允许信号中高频分量通过，而抑制直流和低频信号，幅频曲线如图 9.1(b)所示。

③ 带通滤波电路(BPF)，它只允许一定频段的信号通过，对低于或高于该频段的信号，以及干扰和噪声均进行抑制。幅频曲线如图 9.1(c)所示。

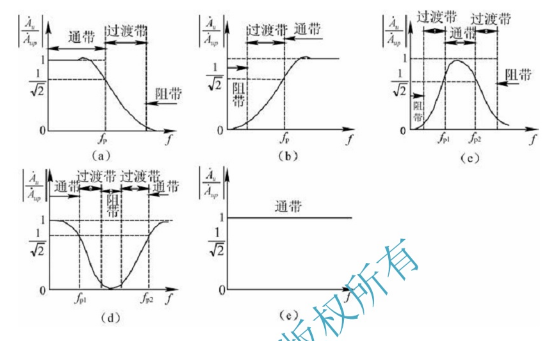


图 9.1 滤波电路的幅频特性示意图

(a) 低通滤波电路；(b) 高通滤波电路；(c) 带通滤波电路；

(d) 带阻滤波电路；(e) 全通滤波电路

④ 带阻滤波电路(BEF)，它能抑制一段频段内的信号，而使此频段外的信号通过，其幅频曲线如图 9.1(d)所示。

⑤ 全通滤波电路(APF)，它只用来改变系统的相频特性，但不影响幅频特性。幅频曲线如图 9.1(e)所示。

(2) 按处理的信号不同，可分为模拟滤波电路和数字滤波电路。

(3) 按使用的滤波元件不同，可分为 LC 滤波电路，RC 滤波电路，RLC 滤波电路。

(4) 按有无使用有源器件分为以下几种。

① 无源滤波电路，它是仅由无源器件(电阻、电容、电感)组成的滤波电路。该电路的优点是电路简单，不需要有直流供电电源，工作可靠。缺点是负载对滤波特性影响较大，无放大能力；使用电感时易引起电磁感应，当要求 L 过大时，电感重量大，成本高。

② 有源滤波电路，它是由无源网络(一般含 R 和 C)和放大电路共同组成。这种电路的优点是不使用电感，体积小，重量轻，可放大通带内信号。由于引进了负反馈，可以改善其性能；负载对滤波特性影响不大。缺点是通带范围受有源器件的带宽限制(一般含运放)；需直流供电电源；可靠性没有无源滤波器高；不适合在高压/大电流下使用。

(5) 按通带特征频率 f_0附近的频率特性曲线形状不同，常用的滤波电路可分为以下几种。

① 巴特沃斯(Butterworth)型滤波电路，该电路幅频特性在通带内比较平坦，故也称最大平坦滤波器。

② 切比雪夫(Chebyshev)型滤波电路，该电路幅频特性曲线在一定范围内有起伏，但在过渡带幅频衰减较快。



图 9.2 所示是以 LPF 为例，进行两种滤波电路的幅频特性比较的示意图。

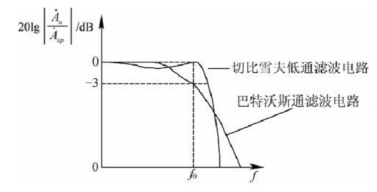


图 9.2 两种类型滤波电路的幅频特性示意图

(6) 按有源滤波器的阶数进行划分，可以分为以下几种。

有源滤波器传输函数分母中“s”的最高次数，即为滤波电路的阶数。因此，有源滤波电路又有一阶、二阶及高阶滤波之分，阶数越高，滤波电路幅频特性过渡带内曲线越陡，形状越接近理想形状。

3. 有源滤波电路的主要参数

(1) 通带电压放大倍数 A_{up}，即通带水平区的电压增益。对于 LPF 而言，A_{up} 就是 $f\to0$ 时，输出/输入电压之比；对于 HPF 而言，A_{up} 就是 $f\to\infty$ 时，输出/输入电压之比。

(2) 特征频率 f_0 和特征角频率 ω_0。该频率直接反映电路器件特征，与滤波电阻、电容有关，通常 $\omega_0=1/RC$ 或 $f_0=1/2\pi RC$，它直接反映了滤波电路中 RC 环的特征。

(3) 通带截止频率 f_p(通带截止角频率 ω_p)。该频率为电压增益下降到 $A_{up}/\sqrt{2}$(即 $0.707A_{up}$)，或相对于 A_{up} 分贝值低于 3 dB 时所对应的频率值(或角频率值)。f_p 与 f_0 不一定始终相等，但相互间存在密切联系。带通(带阻)分别有上、下两个截止频率，如图 9.1(c)、(d)所示。

(4) 通带(阻带)宽度 f_{BW}，是带通(带阻)两个截止频率之差，即 $f_{BW}=f_{p2}-f_{p1}$(设 $f_{p2}>f_{p1}$)。

4. 电压比较器

电压比较器是对两个模拟输入电压进行比较，并将比较结果输出的电路。通常两个输入电压中的一个为参考电压 U_R，另一个为外加输入电压 u_i。比较器的输出有两种可能状态，即高电平或低电平，因此集成运放常常工作在非线性区。电压比较器可以由集成运算放大器组成，也可采用专用的集成电压比较器。由于输出只有高低两种状态，是数字量，因此比较器往往是模拟电路与数字电路的接口电路，并广泛用于模拟信号/数字信号变换、数字仪表、自动控制和自动检测等技术领域，另外，它还是波形产生和变换的基本单元电路。

图 9.3 所示电路为电压比较器。当 $u_i>u_R$ 时，比较器的输出为高电平 U_{OH}；当 $u_i<u_R$ 时，

比较器的输出为低电平 U_{OL}。当比较器的输出电压由一种状态跳变为另一种状态时，相应的输入电压通常称为阈值电压或门限电压，记作 U_T。

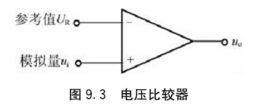


图 9.3　电压比较器

5. 单门限比较器

单门限比较器是指只有一个门限电压的比较器。当输入电压在增大或减小的过程中通过门限电压 U_T时，输出电压产生跃变，从高电平 U_{OH}跳为低电平 U_{OL}，或从低电平 U_{OL}跳为高电平 U_{OH}。电路如图 9.4 所示，其中图(a)参考电压 U_R接集成运放的同相输入端，输入信号 u_i接至反相输入端；图(b)正好相反，U_R接至反相输入端，u_i接至同相输入端。它们均为开环运用。

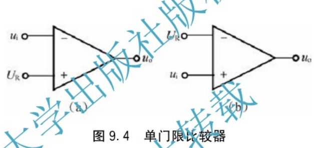


图 9.4　单门限比较器

它们的传输特性如图 9.5(a)所示。它表明输入电压从低逐渐升高经过 U_R时，u_o将从高电平变为低电平。相反，当输入电压从高逐渐降低经过 U_R时，u_o将从低电平变为高电平。我们将比较器的输出电压从一个电平跳变到另一个电平时所对应的输入电压值称为阈值电压或门限电压，简称为阈值，用符号 U_{TH}表示。对于图 9.4 而言，$U_{TH}=U_R$。

同理可得图 9.4(b)的传输特性，如图 9.5(b)所示。U_R可为正，也可为负或零。$U_R=0V$ 时的比较器又称为过零比较器。

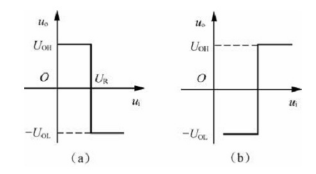


图 9.5　简单电压比较器的传输特性

有时为了减小输出电压的幅值，以适应某种需要(如驱动数字电路的 TTL 器件)，可以在比较器的输出回路中加限幅电路。为防止输入信号过大而损坏集成运放，除了在

比较器的输入回路中串接电阻外，还可以在集成运放的两个输入端并联二极管，其电路如图 9.6 所示。

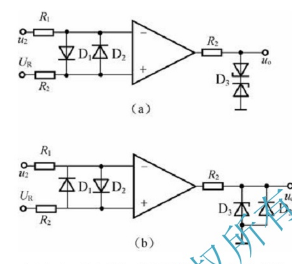


图 9.6　具有输入保护和输出限幅的比较器

6. 滞回比较器

滞回比较器能克服简单比较器抗干扰能力差的缺点。

滞回比较器如图 9.7(a)所示。将输出信号反馈到同相输入端就构成一个正反馈闭环系统，该电路为反相滞回比较器，它是一种典型的由运放构成的双稳态触发器，又称施密特触发器。

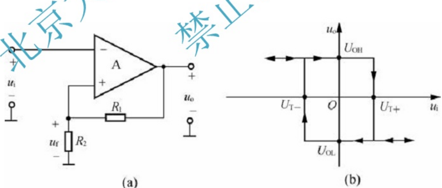


图 9.7　运放构成的反相滞回比较器及其传输特性

(a) 电路结构；(b) 传输特性

图中 R_1、R_2 构成正反馈网络。因为集成运放具有很高的开环电压增益，所以同相输入端(+)与反向输入端(−)只需很小的电压(约±1mV)，就能使输出端的电压接近于电源电压。因此，电路一旦接通，输出端就会处于高电位 U_{OH}，或者处于低电位 U_{OL}。U_{OH} 和 U_{OL} 的值分别接近于运放的供电电源 $\pm U_{CC}$。

(1) 设输出端处在高电平 U_{OH} 状态，则经 R_1、R_2 分压后，反馈电压为

$$u_f=\frac{R_2}{R_1+R_2}U_{OH}=U_{T+}$$



只要输入电压 $u_i<U_{T+}$，输出端就能始终保持在高电平 U_{OH} 状态(稳态之一)。只有当 $u_i>U_{T+}$ 时，才能使输出端由高电平 U_{OH} 跳变到低电平 U_{OL}。通常 U_{T+} 称为上门限电压或关闭电压。

(2) 设输出端处在低电平 U_{OL} 状态，则经 R_1、R_2 分压后，反馈电压 u_f 为

$$u_f=\frac{R_2}{R_1+R_2}U_{OL}=U_{T-}$$

只要输入电压 $u_i>U_{T-}$，输出端就能始终保持在低电平 U_{OL} 状态(稳态之一)。只有当 $u_i<U_{T-}$ 时，才能使输出端由低电平 U_{OL} 跳变到高电平 U_{OH}。通常 U_{T-} 称为下门限电压或开启电压。根据以上分析，可以得到该电路的传输特性曲线，如图 9.7(b)所示，因为该比较器的传输特性曲线形状类似于迟滞回线，故这类比较器又称为迟滞比较器。通常将上门限电压 U_{T+} 与下门限电压 U_{T-} 之差称为回差 Δ_{U_H}。

$$\Delta U_H=U_{T+}-U_{T-}=\frac{R_2}{R_1+R_2}(U_{OH}-U_{OL})$$

上式表明，如果想减小回差，就应当使 R_2+R_1 增大，但这将使触发电路的可靠性降低。

7. 窗口比较器

窗口比较器用于判断输入电压是否在指定的门限电压之内。电路如图 9.8(a)所示，其传输特性如图 9.8(b)所示。

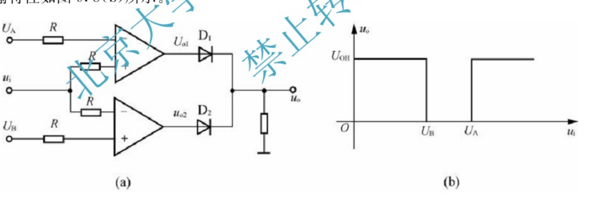


图 9.8 窗口比较器电路与传输特性

(a) 电路图；(b) 传输特性

当 $u_i>U_A$ 时，u_{o1} 为高电平，D_1 导通；u_{o2} 为低电平，D_2 截止，即 $u_o=u_{o1}=U_{OH}$。当 $u_i<U_B$ 时，u_{o1} 为低电平，D_1 截止；u_{o2} 为高电平，D_2 导通，即 $u_o=u_{o2}=U_{OH}$。当 $U_B<u_i<U_A$ 时，$u_{o1}=u_{o2}=U_{OL}$，二极管 D_1、D_2 均截止，$u_o=0V$。

窗口比较器电路可用于监视数字集成电路的供电电源，以保证集成电路安全正常地工作在典型电压附近。



9.1.2 正弦波振荡电路

1. 正弦波振荡电路的振荡条件

为了产生正弦波，必须在放大电路里加入正反馈，因此放大电路和正反馈网络是振荡电路的最主要部分。但是，这两部分构成的振荡器一般得不到正弦波，这是由于很难控制正反馈的量。如果正反馈量大，则增幅，输出幅度越来越大，最后由三极管的非线性限幅，这必然产生非线性失真。反之，如果正反馈量不足，则减幅，可能停振，为此振荡电路要有一个稳幅电路。为了获得单一频率的正弦波输出，应该有选频网络，选频网络往往和正反馈网络或放大电路合而为一。选频网络由 R、C 和 L、C 等电抗性元件组成。正弦波振荡器的名称一般由选频网络来命名。正弦波发生电路是由放大电路、正反馈网络、选频网络和稳幅电路这 4 部分组成的。

产生正弦波的条件与负反馈放大电路产生自激的条件十分类似。只不过负反馈放大电路中是由于信号频率达到了通频带的两端，产生了足够的附加相移，从而才使负反馈变成了正反馈。在振荡电路中加的就是正反馈，振荡建立后只是一种频率的信号。

正弦波振荡电路的方案框图如图 9.9 所示。

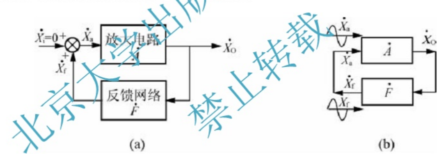


图 9.9 正弦波振荡电路的方案框图

(a) 正反馈放大电路方框图；(b) 正弦波振荡电路方框图

由图 9.9(b)可得：$\dot{X}_a=\dot{X}_i+\dot{X}_f$，若 $\dot{X}_a=\dot{X}_f$，则环路增益 $\dot{A}\dot{F}=1$。

又 $\dot{A}\dot{F}=|\dot{A}\dot{F}|\angle\varphi_a+\varphi_f=AF\angle\varphi_a+\varphi_f$，

故振荡条件为

$$A(\omega)\cdot F(\omega)=1 \qquad \text{振幅平衡条件}$$

$$\varphi_a(\omega)+\varphi_f(\omega)=2n\pi \qquad \text{相位平衡条件}$$

欲使振荡电路能自行建立振荡，还必须满足起振条件：

$$A(\omega)\cdot F(\omega)>1$$

$$\varphi_a(\omega)+\varphi_f(\omega)=2n\pi$$

这样，在电源接通后，噪声中，满足相位平衡条件的某一频率的噪声信号被放大，成为振荡电路的输出信号。

另外，当输出信号幅值增加到一定程度时，就要限制它继续增加，否则波形将出现失

真。稳幅的作用就是，当输出信号幅值增加到一定程度时，使振幅平衡条件从 $AF>1$ 回到 $AF=1$。

2. RC 正弦波振荡电路

RC 文氏电桥振荡器的电路如图 9.10 所示，RC 串并联网络是正反馈选频网络，另外还增加了 R_3 和 R_4 负反馈网络。R_3、R_4 负反馈支路正好构成一个桥路，称为文氏电桥。当 $C_1=C_2$、$R_1=R_2$ 且谐振时，$|\dot{F}|=\dfrac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o}=\dfrac{1}{3}$，$f_0=\dfrac{1}{2\pi RC}$，$\varphi_f=0°$。

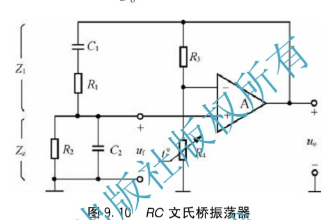


图 9.10　RC 文氏桥振荡器

用瞬时极性法判断可知，电路满足相位平衡条件。为满足振荡的幅度条件 $|\dot{A}\dot{F}|\geqslant 1$，应令 $A_u\geqslant 3$。即

$$A_u=1+\frac{R_3}{R_4}\geqslant 3$$

3. LC 正弦波振荡电路

LC 正弦波振荡电路的构成与 RC 正弦波振荡电路相似，包括放大电路、正反馈网络、选频网络和稳幅电路。这里的选频网络是由 LC 并联谐振电路构成，正反馈网络因不同类型的 LC 正弦波振荡电路而有所不同。

LC 正弦波振荡电路按其反馈电压的取出方式不同，可分为变压器反馈式、电感反馈式以及电容反馈式振荡电路。后两种振荡电路统称三点式振荡电路。

1）变压器反馈式 LC 振荡电路

变压器反馈式 LC 振荡电路如图 9.11 所示。LC 并联谐振电路作为场效应管的漏极负载，反馈信号通过一变压器二次线圈传送到栅极回路。交换反馈线圈的两个线头，可使负反馈和正反馈发生变化。调整反馈线圈的匝数可以改变反馈信号的强度，以使正反馈的幅度条件得以满足。图中电容 C_g 足够大，起耦合信号的作用，可视为短路。

对于 LC 振荡器的分析，主要有 3 个问题：一是看振荡电路的各个组成部分是否存在，且是否合理；二是用瞬时极性法判断振荡电路是否满足相位条件，是否是正反馈；三是看振荡的幅度条件是否满足，主要是指增加或减小反馈信号的途径，具体数值不要求计算。



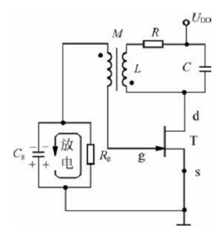


图 9.11　变压器反馈式 LC 振荡电路

对于图 9.11 所示 LC 振荡电路，首先看组成振荡电路的各个部分是否齐全合理，此外，其场效应管构成共源组态放大电路，且偏置合理，漏极是 LC 并联谐振回路。

为了分析相位条件，且认为 LC 并联电路谐振时呈现纯阻性，用瞬时极性法可判断电路是正反馈，且满足相位条件。

反馈电压的大小，可以通过反馈线圈的匝数来加以控制，如果反馈电压太小，则适当增加反馈线圈的匝数，即可满足振荡的幅值条件。

2）三点式 LC 振荡电路

三点式振荡电路分为电感三点式振荡电路和电容三点式振荡电路。

4. 石英晶体振荡电路

频率稳定度一般由 $\dfrac{\Delta f}{f_0}$ 来衡量

式中：Δf 为频率偏移量；f_0 为振荡频率。

选频回路 Q 值越高，选频特性越好，频率越稳定。因此，石英晶体振荡电路具有极高的频率稳定度。

9.2　典型例题分析

例题 1：在下列几种情况下，应分别采用哪种类型的滤波电路(低通、高通、带通、带阻)？①有用信号频率为 100Hz；②有用信号频率低于 400Hz；③希望抑制 50Hz 交流电源的干扰；④希望抑制 500Hz 以下的信号。

解：①带通滤波器；②低通滤波器；③带阻滤波器；④高通滤波器。

例题 2：设运放为理想器件。在下列几种情况下，试回答它们应分别属于哪种类型的滤波电路(低通、高通、带通、带阻)？并定性画出其幅频特性。①理想情况下，当 $f=0$ 和 $f\to\infty$ 时的电压增益相等，且不为零；②直流电压增益就是它的通带电压增益；③在理

想情况下，当 $f \to \infty$ 时的电压增益就是它的通带电压增益；④在 $f=0$ 和 $f \to \infty$ 时，电压增益都等于零。

解：①带阻滤波器；②低通滤波器；③高通滤波器；④带通滤波器。

其幅频特性如图 9.12 所示。

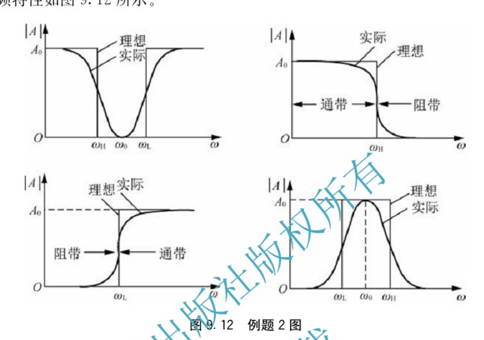


图 9.12 例题 2 图

例题 3：图 9.13 所示为一个一阶低通滤波器电路，设 A 为理想运放，试推导电路的传递函数，并求出其 -3dB 截止角频率 ω_H。

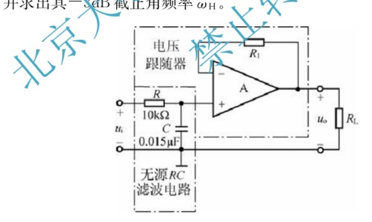


图 9.13 一阶低通滤波电路(例题 3 图)

解：这是一个低通有源滤波电路，考虑到其通带电压增益为 1，且电压跟随器的输入电阻很高，输出电阻很低，传递函数为

$$A(S)=\frac{U_o(S)}{U_i(S)}=\frac{1/SC}{R+\frac{1}{SC}}=\frac{1}{1+SRC}=\frac{1}{1+\frac{S}{\omega_n}}$$

式中：$\omega_0=1/RC$，为特征角频率，也是 -3dB 截止角频率 ω_H。

例题 4：设 A 为理想运放，试写出图 9.14 所示电路的传递函数，并指出这是一个什么类型的滤波电路。



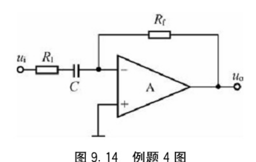


图 9.14 例题 4 图

解：传递函数为

$$A(S)=\frac{U_o(S)}{U_i(S)}=\frac{R_f}{R_1+\frac{1}{SC}}=\frac{SR_fC}{1+SR_1C}$$

上式说明这是一个一阶高通滤波电路。

例题 5：设 A 为理想运放，试写出图 9.15 所示电路的传递函数，并指出这是一个什么类型的滤波电路。

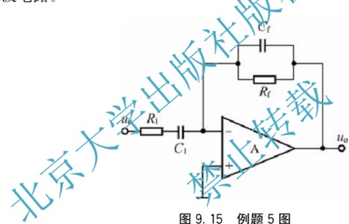


图 9.15 例题 5 图

解：传递函数为

$$A(S)=\frac{U_o(S)}{U_i(S)}=\frac{-(R_f/\!/\frac{1}{SC_f})}{R_1+\frac{1}{SC_1}}=-\frac{SC_1R_f}{1+S(C_1R_1+C_fR_f)+S^2C_1R_1C_fR_f}$$

上式说明这是一个二阶带通滤波电路。

例题 6：电路如图 9.16 所示，试用相位平衡条件判断哪个电路可能振荡，哪个不能，并简述理由。

解：图 9.16(a)所示电路不能振荡。

用瞬时(变化)极性法分析可知，从 T_1 栅极断开，加一个“+”信号，则从 T_2 射极输出为“−”，即 $\phi_A=180°$。考虑到 RC 串并联网络在 $\omega=\omega_0==1/RC$ 时 $\phi_F=0°$，因此反馈回 T_1 栅极的信号为“−”，即 $\phi_A+\phi_F\neq 360°$，不满足相位平衡条件。

图 9.16(b)所示电路能振荡。

当从运放同相端断开并加一(+)信号，则 u_o 为“+”，即 $\phi_A=0°$或 360°。因在 $\omega=\omega_0==$



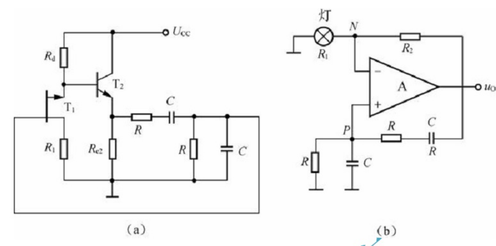


图 9.16　例题 6 图

$1/RC$ 时，$\phi_F=0°$，故经 RC 串并联网络反馈到同相端的信号也为“+”，即有 $\phi_A+\phi_F=0°$或 360°，满足相位平衡条件。

例题 7：一阶 RC 高通或低通电路的最大相移绝对值小于 90°，试从相位平衡条件出发，判断图 9.17 所示电路中，哪个可能振荡，哪个不能，并简述理由。

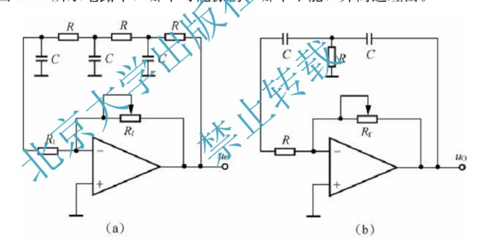


图 9.17　例题 7 图

解：图 9.17(a)所示电路能振荡，图 9.17(b)所示电路不能振荡。

图 9.17(a)中输出电压和输入电压同相($\phi_A=180°$)，且三级移相电路为超前网络，在信号频率为 0 到无穷大时相移为+270°～0°，因此总有一个频率 f_0满足 $\phi_A+\phi_F=360°$，可以振荡。

图 9.17(b)中，输出电压和输入电压仍然同相($\phi_A=180°$)，但因只有两级移相网络，其最大移相角小于 180°，即 $\phi_A+\phi_F<360°$，不能振荡。

例题 8：电路如图 9.18 所示，试用相位平衡条件判断哪个能振荡，哪个不能，说明理由。



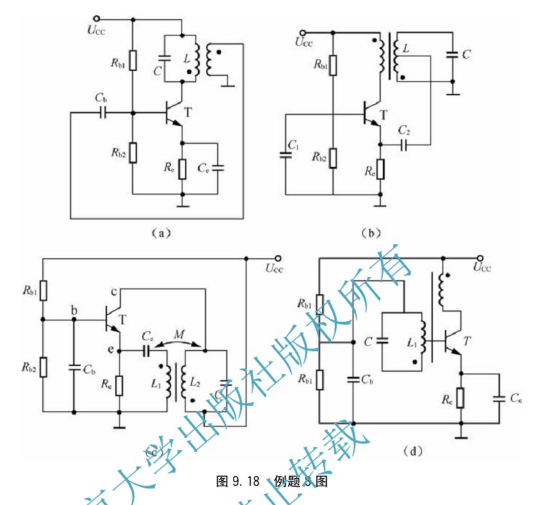


图 9.18　例题 8 图

解：图 9.18(a)所示电路不能振荡，图 9.18(b)所示电路能振荡，图 9.18(c)所示电路不能振荡，图 9.18(d)所示电路能振荡。

图 9.18 中(a)图为共射极放大电路，设从基极断开，并在输入端加“+”信号，经变压器反馈回来的为“−”信号，即 $\phi_A+\phi_F=180°$，不满足相位平衡条件，不能振荡。

(b)图为共基极放大电路，设从射极断开，并在输入端加“+”信号，经变压器反馈回来的为“+”信号，即 $\phi_A+\phi_F=360°$，即存在满足正弦波振荡相位条件的频率 f_0(此时 $\phi_A+\phi_F=360°$)；且在 $f=f_0$时有可能满足起振条件$|\dot{A}\dot{F}|>1$，故可能产生正弦波振荡。

(c)图为共基极放大电路，设从射极断开，并在输入端加“+”信号，经 L_1反馈回来的为“−”信号，即 $\phi_A+\phi_F=180°$，不满足相位平衡条件，不能振荡。

(d)图为共射极放大电路，设从基极断开，并在输入端加“+”信号，经变压器反馈到 L_1的信号为“+”，即 $\phi_A+\phi_F=360°$，即存在满足正弦波振荡相位条件的频率 f_0有可能满足起振条件$|\dot{A}\dot{F}|>1$，故可能产生正弦波振荡。

例题 9：对图 9.19 所示的各三点式振荡器的交流通路(或电路)，试用相位平衡条件判断哪个可能振荡，哪个不能，指出可能振荡的电路属于什么类型。

解：用瞬时极性法判断。

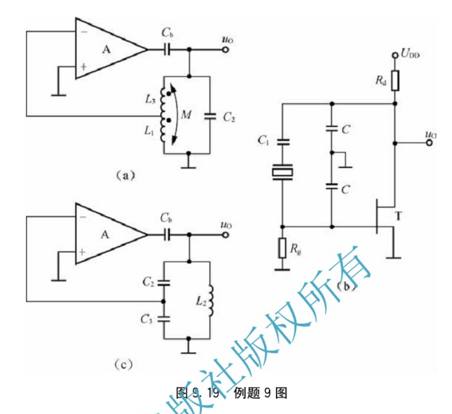


图 9.19　例题 9 图

图 9.19(a)所示电路不能振荡。例如，设从反相端加入“+”信号，则由 L_1得到的反馈信号为“−”，即 $\phi_A+\phi_F=180°$，不满足相位平衡条件。

图 9.19(b)所示电路可能振荡。当石英晶体呈感性时，则构成电容三点式振荡电路。例如，当从栅极加入“+”信号，u_o为“−”，经与栅极相连的电容获得的反馈信号为“+”，即 $\phi_A+\phi_F=360°$，满足相位平衡条件。

图 9.19(c)所示电路不能振荡。例如，设从反相输入端加入“+”信号，则由 C_3获得的反馈信号为“−”，即 $\phi_A+\phi_F=180°$，不满足相位平衡条件。

例题 10：两种石英晶体振荡器原理电路如图 9.20 所示。试说明它属于哪种类型的晶体振荡电路，为什么说这种电路结构有利于提高频率稳定度。

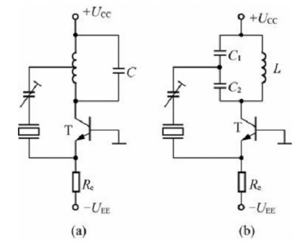


图 9.20　例题 10 图

解： 图 9.20(a)所示是电感三点式晶振电路。

图 9.20(b)所示是电容三点式晶振电路。

由于石英晶体的品质因数 Q 值很高，因而这种电路的频率稳定度很高，当它工作于串联谐振方式时，振荡频率的稳定度可以更高。为了不降低品质因数 Q，外电路的串联电阻和石英晶体的阻尼电阻 R 相比，要尽可能小，图 9.20(a)、图 9.20(b)两电路符合上述要求。

9.3　自　测　题

自测题一： 判断下列说法是否正确。

(1) 在图 9.21 所示方框图中，若 $\phi_F=180°$，则只有当 $\phi_A=\pm180°$时，电路才能产生正弦波振荡。　(　　)

图 9.21　题(1)图

(2) 只要电路引入了正反馈，就一定会产生正弦波振荡。　(　　)

(3) 凡是振荡电路中的集成运放均工作在线性区。　(　　)

(4) 非正弦波振荡电路与正弦波振荡电路的振荡条件完全相同。　(　　)

(5) 在图 9.21 所示方框图中，产生正弦波振荡的相位条件是 $\phi_F=\pm\phi_A$。　(　　)

(6) 因为 RC 串并联选频网络作为反馈网络时的 $\phi_F=0°$，单管共集放大电路的 $\phi_A=0°$，满足正弦波振荡的相位条件 $\phi_A+\phi_F=2n\pi$(n 为整数)，故合理连接它们可以构成正弦波振荡电路。　(　　)

(7) 在 RC 桥式正弦波振荡电路中，若 RC 串并联选频网络中的电阻均为 R，电容均为 C，则其振荡频率 $f_0=1/RC$。　(　　)

(8) 电路只要满足 $|\dot{A}\dot{F}|=1$，就一定会产生正弦波振荡。　(　　)

(9) 负反馈放大电路不可能产生自激振荡。　(　　)

(10) 在 LC 正弦波振荡电路中，不用通用型集成运放作放大电路的原因是其上限截止频率太低。　(　　)

(11) 只要集成运放引入正反馈，就一定工作在非线性区。　(　　)

(12) 当集成运放工作在非线性区时，输出电压不是高电平，就是低电平。　(　　)

(13) 一般情况下，在电压比较器中，集成运放不是工作在开环状态，就是仅仅引入了正反馈。　(　　)

（14）如果一个滞回比较器的两个阈值电压和一个窗口比较器的相同，那么当它们的输入电压相同时，它们的输出电压波形也相同。（ ）

（15）在输入电压从足够低逐渐增大到足够高的过程中，单限比较器和滞回比较器的输出电压均只跃变一次。（ ）

（16）单限比较器比滞回比较器抗干扰能力强，而滞回比较器比单限比较器灵敏度高。（ ）

解：（1）√ （2）× （3）× （4） × （5）√ （6）× （7）× （8）× （9）× （10）√ （11）× （12）√ （13）√ （14）× （15）√ （16）×

自测题二：选择或填写正确答案。

（1）已知图 9.22(a)所示方框图各点的波形如图 9.22(b)所示，填写各电路的名称。

电路 1 为________，电路 2 为________，电路 3 为________，电路 4 为________。

解：正弦波振荡电路，同相输入过零比较器，反相输入积分运算电路，同相输入滞回比较器。

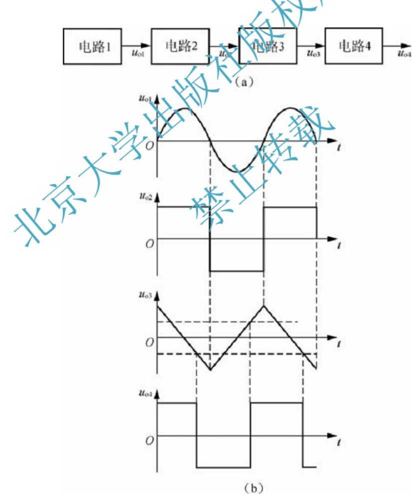


图 9.22 题(1)图

（2）现有电路如下：A. *RC* 桥式正弦波振荡电路；B. *LC* 正弦波振荡电路；C. 石英晶体正弦波振荡电路

选择合适答案填入空内，只需填入 A、B 或 C。

① 制作频率为 20Hz～20kHz 的音频信号发生电路，应选用________。

② 制作频率为 2～20MHz 的接收机的本机振荡器，应选用________。

③ 制作频率非常稳定的测试用信号源，应选用________。

解：①A　②B　③C

(3) 选择下面一个答案填入空内，只需填入 A、B 或 C。

A. 容性　　B. 阻性　　C. 感性

① LC 并联网络在谐振时呈________，在信号频率大于谐振频率时呈________，在信号频率小于谐振频率时呈________。

② 当信号频率等于石英晶体的串联谐振频率或并联谐振频率时，石英晶体呈________；当信号频率在石英晶体的串联谐振频率和并联谐振频率之间时，石英晶体呈________；其他情况下，石英晶体呈 ________。

③ 当信号频率 $f=f_0$时，RC 串并联网络呈 ________。

解：(1) B　A　C　　(2) B　C　A　　(3) B

自测题三：分析计算题。

(1) 改错：改正图 9.23 所示各电路中的错误，使电路可能产生正弦波振荡。要求不能改变放大电路的基本接法(共射、共基、共集)。

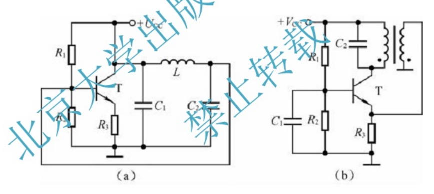


图 9.23　题(1)图

解：图 9.23(a)电路中加集电极电阻 R_c及放大电路输入端的耦合电容。

图 9.23(b)所示电路中，变压器副边与放大电路之间加耦合电容，改同名端。

(2) 试将图 9.24 所示电路合理连线，组成 RC 桥式正弦波振荡电路。

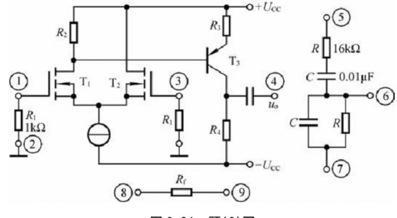


图 9.24　题(2)图



解：④、⑤与⑨相连，③与⑧相连，①与⑥相连，②与⑦相连。如图 9.25 所示。

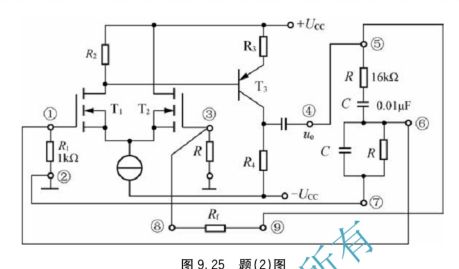


图 9.25　题(2)图

(3) 试分别求出图 9.26 所示各电路的电压传输特性。

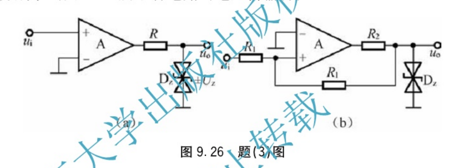


图 9.26　题(3)图

解：图 9.26(a)所示电路为同相输入的过零比较器；图 9.26(b)所示电路为同相输入的滞回比较器，两个阈值电压为 $\pm U_T = \pm 0.5\ U_Z$。两个电路的电压传输特性如图 9.27 所示。

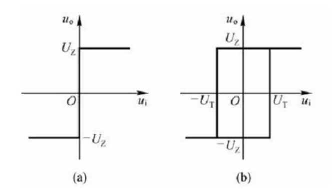


图 9.27　题(3)图

(4) 电路如图 9.28 所示。

① 分别说明 A_1 和 A_2 各构成哪种基本电路。

② 求出 u_{o1} 与 u_o 的关系曲线 $u_{o1} = f(u_o)$。

③ 求出 u_o 与 u_{o1} 的运算关系式 $u_o = f(u_{o1})$。





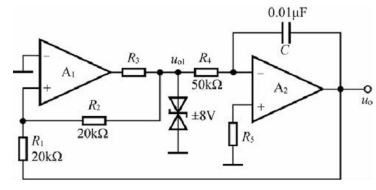


图 9.28　题(4)图

④ 定性画出 u_{o1} 与 u_o 的波形。

⑤ 说明若要提高振荡频率，则可以改变哪些电路参数，如何改变。

解： ① A_1：滞回比较器；A_2：积分运算电路。

② 根据 $u_{p1}=\dfrac{R_1}{R_1+R_2}\cdot u_{o1}+\dfrac{R_2}{R_1+R_2}\cdot u_o=\dfrac{1}{2}(u_{o1}+u_o)=u_{n1}=0$，

可得 $\pm U_T=\pm 8V$。

u_{o1} 与 u_o 的关系曲线如图 9.29(a)所示。

③ u_o 与 u_{o1} 的运算关系式。

$$u_o=-\frac{1}{R_4C}u_{o1}(t_2-t_1)+u_o(t_1)=-2000u_{o1}(t_2-t_1)+u_o(t_1)$$

④ u_{o1} 与 u_o 的波形如图 9.29(b)所示。

⑤ 要提高振荡频率，可以减小 R_4、C、R_1 或增大 R_2。

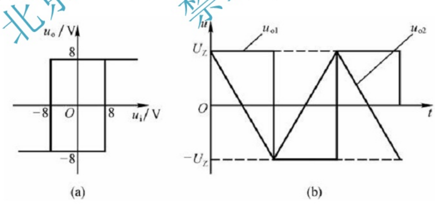


图 9.29　题(5)图

9.4　练　习　题

(1) 判断图 9.30 所示各电路是否可能产生正弦波振荡，简述理由。设图 9.30(b)中 C_4 容量远大于其他 3 个电容的容量。



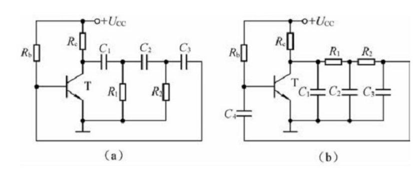


图 9.30　题(1)图

（2）电路如图 9.30 所示，试问

① 若去掉两个电路中的 R_2 和 C_3，则两个电路是否可能产生正弦波振荡？为什么？

② 若在两个电路中再加一级 RC 电路，则两个电路是否可能产生正弦波振荡？为什么？

③ 电路如图 9.31 所示，试求解：①R_W的下限值；②振荡频率的调节范围。

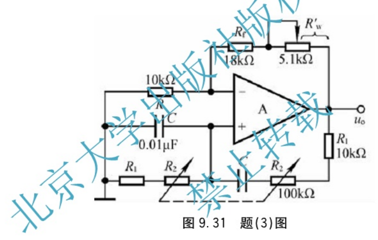


图 9.31　题(3)图

（4）电路如图 9.32 所示，稳压管 D_Z起稳幅作用，其稳定电压$\pm U_Z = \pm 6V$。试估算：①输出电压不失真情况下的有效值；②振荡频率。

（5）电路如图 9.33 所示。

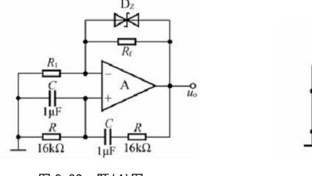


图 9.32　题(4)图

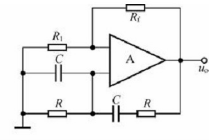


图 9.33　图(5)图

① 为使电路产生正弦波振荡，标出集成运放的“+”和“−”，并说明电路是哪种正弦波振荡电路。





② 若 R_1短路，则电路将产生什么现象？

③ 若 R_1断路，则电路将产生什么现象？

④ 若 R_f短路，则电路将产生什么现象？

⑤ 若 R_f断路，则电路将产生什么现象？

(6) 图 9.34 所示电路为正交正弦波振荡电路，它可产生频率相同的正弦信号和余弦信号。已知稳压管的稳定电压 $\pm U_Z = \pm 6\text{V}$，$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$，$C_1 = C_2 = C$。

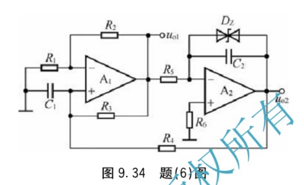


图 9.34　题(6)图

① 试分析电路为什么能够满足产生正弦波振荡的条件。

② 求出电路的振荡频率。

③ 画出 $\dot{U}_{o1}$ 和 $\dot{U}_{o2}$ 的波形图，要求表示出它们的相位关系，并分别求出它们的峰值。

(7) 分别标出图 9.35 所示各电路中变压器的同名端，使之满足正弦波振荡的相位条件。

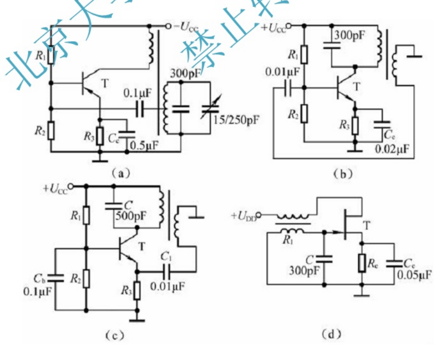


图 9.35　题(7)图

(8) 分别判断图 9.36 所示各电路是否满足正弦波振荡的相位条件。

(9) 改正图 9.36(b)、(c)所示两电路中的错误，使之有可能产生正弦波振荡。



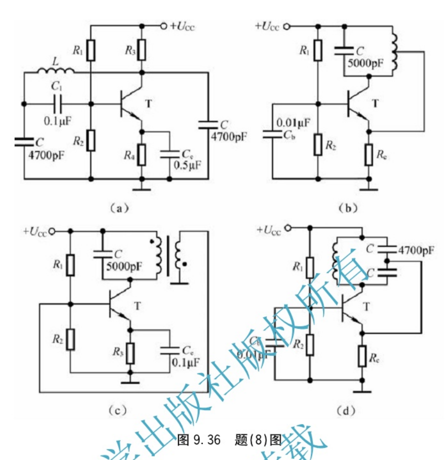


图 9.36　题(8)图

（10）试分别指出图 9.37 所示两电路中的选频网络、正反馈网络和负反馈网络，并说明电路是否满足正弦波振荡的相位条件。

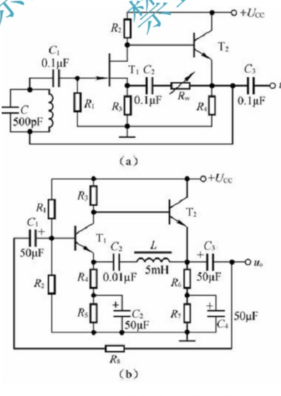


图 9.37　题(10)图





（11）试分别求解图 9.38 所示各电路的电压传输特性。

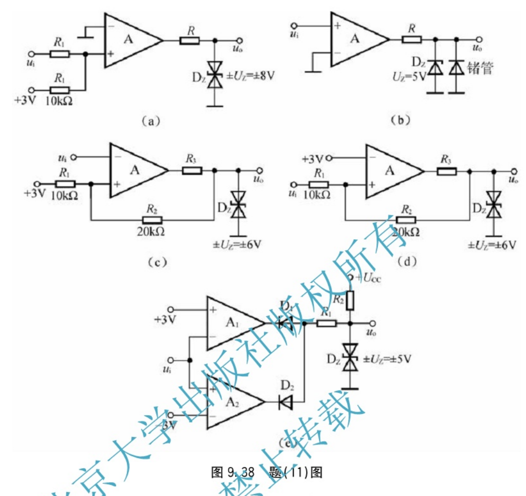


图 9.38　题(11)图

（12）已知 3 个电压比较器的电压传输特性分别如图 9.39(a)、(b)、(c)所示，它们的输入电压波形均如图 9.36(d)所示，试画出 u_{o1}、u_{o2} 和 u_{o3} 的波形。

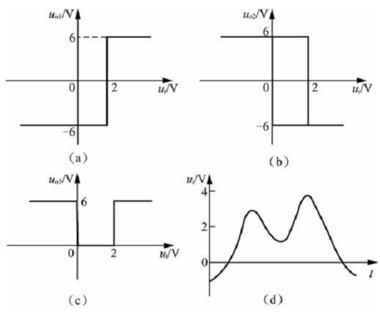
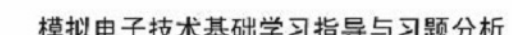


图 9.39　题(12)图

(13) 图 9.40 所示为光控电路的一部分，它将连续变化的光电信号转换成离散信号(即不是高电平，就是低电平)，电流 I 随光照的强弱而变化。①在 A_1 和 A_2 中，哪个工作在线性区？哪个工作在非线性区？为什么？②试求出表示 u_o 与 i 关系的传输特性。

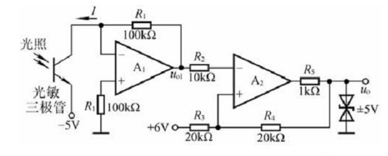


图 9.40　题(13)图

(14) 设计 3 个电压比较器，它们的电压传输特性分别如图 9.39(a)、(b)、(c)所示。要求合理选择电路中各电阻的阻值，限定最大值为 50kΩ。

(15) 在图 9.41 所示电路中，已知 $R_1=10\text{k}\Omega$，$R_2=20\text{k}\Omega$，$C=0.01\mu\text{F}$，集成运放的最大输出电压幅值为 ±12V，二极管的动态电阻可忽略不计。①求出电路的振荡周期；②画出 u_o 和 u_C 的波形。

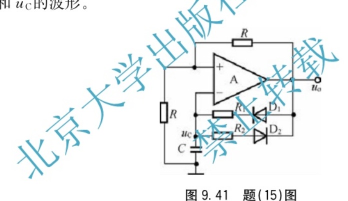


图 9.41　题(15)图

(16) 图 9.42 所示电路为某同学所接的方波发生电路，试找出图中的 3 个错误，并改正。

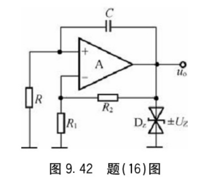


图 9.42　题(16)图

(17) 波形发生电路如图 9.43 所示，设振荡周期为 T，在一个周期内 $u_{o1}=U_Z$ 的时间为 T_1，则占空比为 T_1/T；在电路某一参数变化时，其余参数不变。选择①增大、②不变或③减小填入空内。



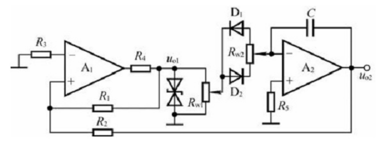


图 9.43 题(17)图

当 R_1 增大时，u_{o1} 的占空比将________，振荡频率将________，u_{o2} 的幅值将________；若 R_{W1} 的滑动端向上移动，则 u_{o1} 的占空比将________，振荡频率将________，u_{o2} 的幅值将________；若 R_{W2} 的滑动端向上移动，则 u_{o1} 的占空比将________，振荡频率将________，u_{o2} 的幅值将________。

(18) 电路如图 9.44 所示，已知集成运放的最大输出电压幅值为±12V，U_I的数值在 u_{o1} 的峰-峰值之间。①求解 u_{o3} 的占空比与 U_I的关系式；②设 $U_I=2.5V$，画出 u_{o1}、u_{o2} 和 u_{o3} 的波形。

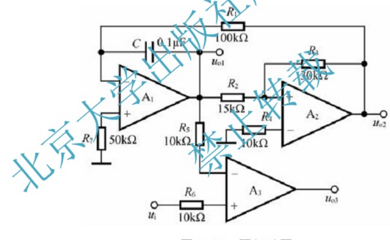


图 9.44 题(18)图

(19) 试将正弦波电压转换为二倍频锯齿波电压，要求画出原理框图来，并定性画出各部分输出电压的波形。

(20) 试分析图 9.45 所示各电路输出电压与输入电压的函数关系。

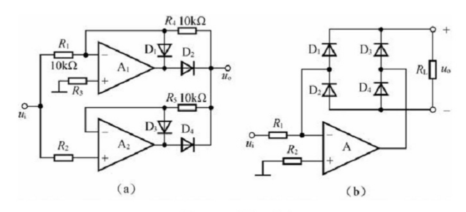


图 9.45 题(20)图

(21) 电路如图 9.46 所示。①定性画出 u_{o1} 和 u_o 的波形；②估算振荡频率与 u_i 的关系式。

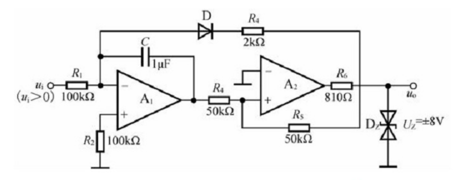


图 9.46 题(21)图

练习题答案

(1) 解：图 9.30(a)所示电路有可能产生正弦波振荡。因为共射放大电路输出电压和输入电压反相($\phi_A=-180°$)，且图中三级移相电路为超前网络，在信号频率为 0 到无穷大时相移为$+270°\sim0°$，因此存在使相移为$+180°$($\phi_F=+180°$)的频率，即存在满足正弦波振荡相位条件的频率 f_0(此时 $\phi_A+\phi_F=0°$)；且在 $f=f_0$ 时有可能满足起振条件$|\dot{A}\dot{F}|>1$，故可能产生正弦波振荡。

图 9.30(b)所示电路有可能产生正弦波振荡。因为共射放大电路输出电压和输入电压反相($\phi_A=-180°$)，且图中三级移相电路为滞后网络，在信号频率为 0 到无穷大时相移为$0°\sim-270°$，因此存在使相移为$-180°$($\phi_F=-180°$)的频率，即存在满足正弦波振荡相位条件的频率 f_0(此时 $\phi_A+\phi_F=-360°$)；且在 $f=f_0$ 时有可能满足起振条件$|\dot{A}\dot{F}|>1$，故可能产生正弦波振荡。

(2) 解：① 不能。因为图 9.30(a)所示电路在信号频率为 0 到无穷大时相移为$+180°\sim0°$，图 9.30(b)所示电路在信号频率为 0 到无穷大时相移为$0°\sim-180°$，在相移为$\pm180°$时反馈量为 0，因而不可能产生正弦波振荡。

② 可能。因为存在相移为$\pm180°$的频率，满足正弦波振荡的相位条件，且电路有可能满足幅值条件，因此可能产生正弦波振荡。

(3) 解：① 根据起振条件：$R_f+R'_W>2R$，$R'_W>2\text{k}\Omega$。故 R_W 的下限值为 2kΩ。

② 振荡频率的最大值和最小值分别为

$$f_{0\max}=\frac{1}{2\pi R_1C}\approx1.6\text{kHz}$$

$$f_{0\min}=\frac{1}{2\pi(R_1+R_2)C}\approx145\text{Hz}$$



（4）解：① 输出电压不失真情况下的峰值是稳压管的稳定电压，故其有效值为

$$U_o = \frac{1.5U_Z}{\sqrt{2}} \approx 6.36\text{V}$$

② 电路的振荡频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \approx 9.95\text{Hz}$$

（5）解：① 上“－”下“＋”

② 输出严重失真，几乎为方波。

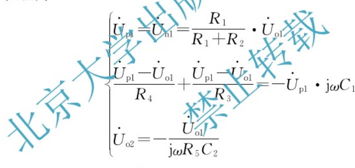
③ 输出为零。

④ 输出为零。

⑤ 输出严重失真，几乎为方波。

（6）解：① 在特定频率下，由 A_2 组成的积分运算电路的输出电压 $\dot{U}_{o2}$ 超前输入电压 $\dot{U}_{o1}$ 90°，而由 A_1 组成的电路的输出电压 $\dot{U}_{o1}$ 滞后输入电压 $\dot{U}_{o2}$ 90°，因而 $\dot{U}_{o1}$ 和 $\dot{U}_{o2}$ 互为依存条件，即存在 f_0 满足相位条件。在参数选择合适时也满足幅值条件，故电路在两个集成运放的输出同时产生正弦和余弦信号。

② 解方程组为



$$\begin{cases} \dot{U}_{p1} = \dot{U}_{n1} = \dfrac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \dot{U}_{o1} \\ \dfrac{\dot{U}_{p1} - \dot{U}_{o1}}{R_4} + \dfrac{\dot{U}_{p1} - \dot{U}_{o1}}{R_3} = -\dot{U}_{p1} \cdot \text{j}\omega C_1 \\ \dot{U}_{o2} = -\dfrac{\dot{U}_{o1}}{\text{j}\omega R_5 C_2} \end{cases}$$

可得正实根，求出 $f_0 = \dfrac{1}{\sqrt{2}\pi RC}$。

③ 输出电压 u_2 的最大值 $U_{o2max} = U_Z = 6\text{V}$。

对方程组中的第三式取模，并将 $\omega_0 = 2\pi f_0 = \dfrac{2\pi}{\sqrt{2}RC}$ 代入可得 $|\dot{U}_{o1}| = \sqrt{2}\,|\dot{U}_{o2}|$，故 $U_{o1max} = \sqrt{2}U_{o2max} \approx 8.5\text{V}$。

若 u_{o1} 为正弦波，则 u_{o2} 为余弦波，如图 9.47 所示。

（7）解：图 9.35 所示各电路中变压器的同名端如图 9.48 所示。

（8）解：图 9.36(a)可能，图 9.36(b)不能，图 9.36(c)不能，图 9.36(d)可能。

（9）解：应在图 9.36(b)所示电路电感反馈回路中加耦合电容。

应在图 9.36(c)所示电路放大电路的输入端(基极)加耦合电容，且将变压器的同名端改为原边的上端和副边的上端为同名端，或它们的下端为同名端。

改正后的电路如图 9.49 所示。

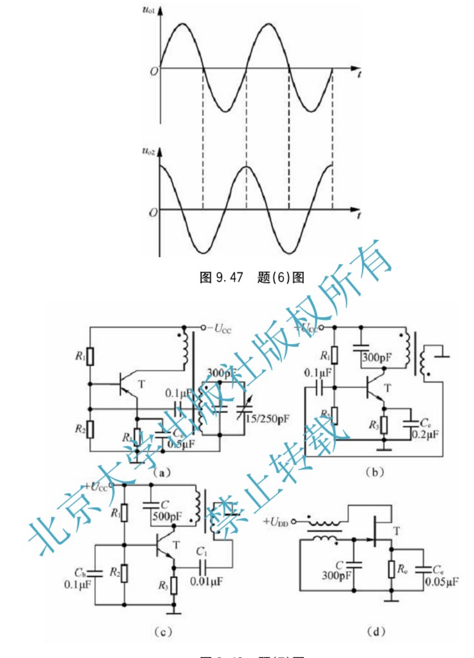


图 9.47　题(6)图

图 9.48　题(7)图

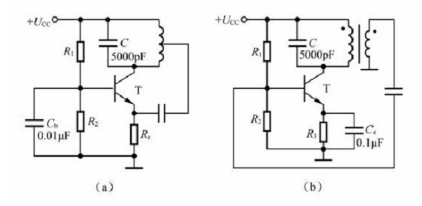


图 9.49　题(9)图



(10) 解：在图 9.37(a)所示电路中：选频网络为 C 和 L；正反馈网络为 R_3、C_2 和 R_W；负反馈网络为 C 和 L。电路满足正弦波振荡的相位条件。

在图 9.37(b)所示电路中：选频网络为 C_2 和 L；正反馈网络为 C_2 和 L；负反馈网络为 R_8。电路满足正弦波振荡的相位条件。

(11) 解：图 9.38(a)所示电路为单限比较器，$u_o=\pm U_Z=\pm 8V$，$U_T=-3V$，其电压传输特性如图 9.50(a)所示。

图 9.38(b)所示电路为过零比较器，$U_{OL}=-U_D=-0.2V$，$U_{OL}=+U_Z=+6V$，$U_T=0V$。其电压传输特性如图 9.50(b)所示。

图 9.38(c)所示电路为反相输入的滞回比较器，$u_o=\pm U_Z=\pm 6V$。令

$$u_p=\frac{R_1}{R_1+R_2}\cdot u_o+\frac{R_2}{R_1+R_2}\cdot U_{REF}=u_n=u_i$$

求出阈值电压为

$$U_{T1}=0V,\ U_{T2}=4V$$

其电压传输特性如图 9.50(c)所示。

图 9.38(d)所示电路为同相输入的滞回比较器，$u_o=\pm U_Z=\pm 6V$。令

$$u_p=\frac{R_2}{R_1+R_2}\cdot u_i+\frac{R_1}{R_1+R_2}\cdot u_{o1}=u_n=3V$$

得出阈值电压 $U_{T1}=1.5V$，$U_{T2}=7.5V$。

其电压传输特性如图 9.50(d)所示。

图 9.38(e)所示电路为窗口比较器，$u_o=\pm U_Z=\pm 5V$，$\pm U_T=\pm 3V$，其电压传输特性如图 9.50(e)所示。

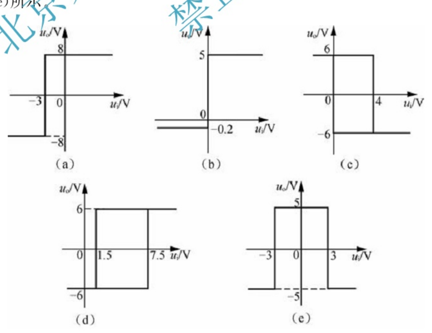


图 9.50　题(11)图

(12) 解：根据 3 个电压比较器的电压传输特性画出的在输入电压作用下它们的输出电压波形，如图 9.51 所示。

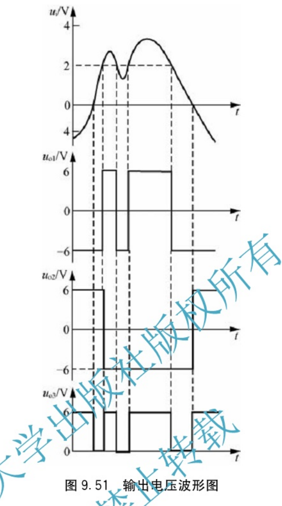


图 9.51　输出电压波形图

(13) 解：①A_1工作在线性区(电路引入了负反馈)；A_2工作在非线性区(电路仅引入了正反馈)。

② u_o与 i 关系式为

$$u_{o1}=-i_iR_1=-100i_i$$

u_o与 u_{o1}的电压传输特性如图 9.52(a)所示，因此 u_o与 i 关系的传输特性如图 9.52(b)所示。

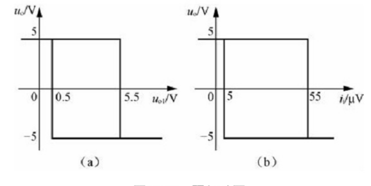


图 9.52　题(13)图

(14) 解：具有图 9.39(a)所示电压传输特性的电压比较器为同相输入的单限比较器。

输出电压 $u_o = \pm U_Z = \pm 6V$，阈值电压 $U_T = 2V$，电路如图 9.53(a)所示。

具有图 9.39(b)所示电压传输特性的电压比较器为反相输入的滞回比较器。输出电压 $u_o = \pm U_Z = \pm 6V$；阈值电压 $U_{T1} = 0V$，$U_{T2} = 2V$，说明电路输入有 U_{REF} 作用，根据 $u_p = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_o + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{REF} = u_n = u_i$

列方程，令 $R_2 = 50k\Omega$，可解出 $R_1 = 10k\Omega$，$U_{REF} = 1.2V$。电路如图 9.53(b)所示。

具有图 9.39(c)所示电压传输特性的电压比较器为窗口单限比较器。输出电压 $U_{OL} = 0V$，$U_{OH} = 6V$，阈值电压 $U_{T1} = 0V$，$U_{T1} = 2V$。电路如图 9.53(c)所示。

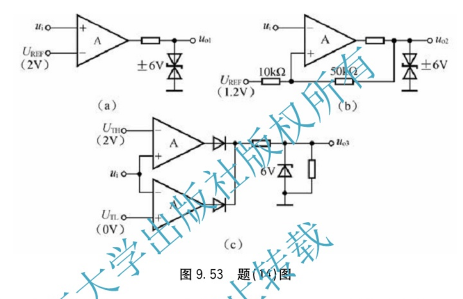


图 9.53　题(14)图

(15) 解：① 振荡周期 $T \approx (R_1 + R_2)C\ \ln 3 \approx 3.3ms$；②脉冲宽度 $T_1 \approx R_1 C\ \ln 3 \approx 1.1ms$。$u_o$ 和 u_C 的波形如图 9.54 所示。

(16) 解：图 9.39 所示电路中有 3 处错误：①集成运放“+”“−”接反；②R、C 位置接反；③输出限幅电路无限流电阻。改正后的电路如图 9.55 所示。

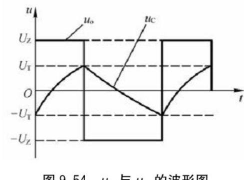


图 9.54　u_o 与 u_C 的波形图

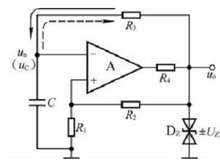


图 9.55　改正后的电路

(17) 解：设 R_{W1}、R_{W2} 在未调整前滑动端均处于中点，则应填入②，①，③；②，①，②；③，②；②。

(18) 解：在图 9.44 所示电路中，A_1 和 A_2 组成矩形波-三角波发生电路。

① 在 A_2 组成的滞回比较器中，令

$$u_{\mathrm{p}}=\frac{R_2}{R_2+R_3}\cdot u_{\mathrm{o2}}+\frac{R_3}{R_2+R_3}\cdot u_{\mathrm{o1}}=0$$

求出阈值电压：

$$\pm U_{\mathrm{T}}=\pm\frac{R_2}{R_3}\cdot U_{\mathrm{OM}}=\pm 6\mathrm{V}$$

在 A_1 组成的积分运算电路中，运算关系式为

$$u_{\mathrm{o}}=-\frac{1}{RC}u_{\mathrm{o2}}(t_2-t_1)+u_{\mathrm{o}}(t_1)$$

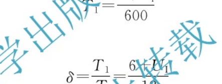
在二分之一振荡周期内，积分起始值 $u_{\mathrm{o1}}(t_1)=-U_{\mathrm{T}}=-6\mathrm{V}$，终了值 $u_{\mathrm{o1}}(t_1)=-U_{\mathrm{T}}=6\mathrm{V}$，$u_{\mathrm{o2}}=-U_{\mathrm{OM}}=-12\mathrm{V}$，代入上式，即

$$6=-\frac{1}{10^5\times10^{-7}}\times(-12)\times\frac{T}{2}-6$$

求出振荡周期 $T=20\mathrm{ms}$。

求解脉冲宽度 T_1 为

$$U_{\mathrm{I}}=-\frac{1}{RC}\cdot(-U_{\mathrm{OM}})\cdot\frac{T_1}{2}-U_{\mathrm{T}}$$



$$T_1=\frac{6+u_{\mathrm{i}}}{600}$$

求解占空比为

$$\delta=\frac{T_1}{T}=\frac{6+U_{\mathrm{I}}}{12}$$

② u_{o1}、u_{o2} 和 u_{o3} 的波形如图 9.56 所示。

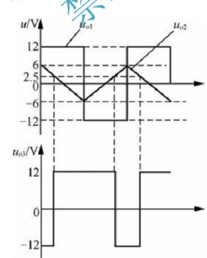


图 9.56 u_{o1}、u_{o2}、u_{o3} 波形图

(19) 解：原理框图和各部分输出电压的波形如图 9.57 所示。

(20) 解：图示两个电路均为绝对值运算电路。运算关系式分别为

图 9.45 中图(a)，$u_{\mathrm{o}}=|u_{\mathrm{i}}|$；图 9.45 中图(b)，$u_{\mathrm{o}}=\frac{R_{\mathrm{L}}}{R_1}|u_{\mathrm{i}}|$。



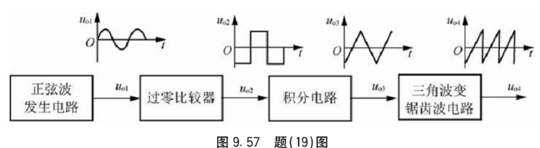


图 9.57　题(19)图

(21) 解：① u_{o1}和 u_o的波形如图 9.58 所示。

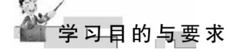
② 求解振荡频率：首先求出电压比较器的阈值电压，然后根据振荡周期近似等于积分电路正向积分时间求出振荡周期，振荡频率是其倒数。

$\pm U_T = \pm U_Z = \pm 8\text{V}$，$U_T \approx -\frac{1}{R_1 C}u_i T - U_T$，$T \approx \frac{2U_T R_1 C}{u_i}$，$f \approx \frac{u_i}{2U_T R_1 C} = 0.625u_i$。

图 9.58　u_{o1}与 u_o的波形图

第 10 章

直流稳压电源



学习目的与要求

(1) 正确理解直流稳压电源的组成及各部分的作用。

(2) 能够分析整流电路的工作原理，估算输出电压及电流的平均值。

(3) 了解滤波电路工作原理，能估算电容滤波电路输出电压平均值。

(4) 掌握稳压管稳压电路的工作原理，能合理选择限流电阻。

(5) 理解串联型稳压电路的工作原理。

(6) 了解集成稳压器的工作原理及使用方法。

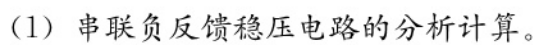


知识架构

- 直流稳压电源概述
- 稳压管稳压电路
- 具有放大环节的串联型稳压电路
- 稳压电路的质量指标
- 集成三端式稳压器
  - 概述
  - 三端式固定输出集成稳压器
  - 三端式可调集成稳压器
- 开关型稳压电源
  - 开关型稳压电源的特点和类型
  - 自激式开关型稳压电源的基本工作原理
  - SW3524 集成单片脉宽调制式开关稳压电源



难点



(1) 串联负反馈稳压电路的分析计算。

(2) 稳压电路工作原理。

(3) 并联型稳压电路的缺点及解决办法。



(1) 直流稳压电源的概念及其作用。

(2) 两种稳压类型电路的特点。

(3) 稳压电源的组成以及各部分的作用。

10.1 知识要点

10.1.1 直流稳压电源概述

1. 结构和作用

将220V、50Hz的交流电压转换为幅值稳定的直流电压，并能提供一定的直流电流。直流电源的组成如图10.1所示。

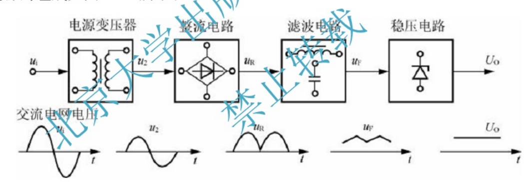


图10.1　直流电源的组成

(1) 电源变压器：将220V的交流电压变换为所需要的交流电压值u_2。

(2) 整流电路：利用二极管单向导电性将交流电压整流为单向脉动的直流电压u_R。

(3) 滤波电路：通过电容或电感等储能元件组成的滤波电路减小其脉动成分，从而得到比较平滑的直流电压u_F。

(4) 加稳压电路：可利用负反馈等措施维持输出直流电压的稳定。

2. 桥式整流电路

1) 工作原理

桥式整流电路图如图10.2所示，u_2的正半周，电流从变压器副边线圈上端流出，经过D_1流向R_L，再由D_3流回变压器，D_1、D_3正向导通，D_2、D_4反偏截止。在负载上产生一个极性为上正下负的输出电压。

u_2 的负半周，电流从变压器副边线圈的下端流出，经过 D_2 流向 R_L，再由 D_4 流回变压器，D_1、D_3 反偏截止，D_2、D_4 正向导通。电流流过 R_L 时产生的电压极性仍是上正下负，与正半周时相同。

桥式整流电路的工作波形：通过负载 R_L 的电流 i_L 以及电压 u_L 的波形都是单方向的全波脉动波形。

桥式整流电路的优点是输出电压高，纹波电压较小，二极管所承受的最大反向电压较低，电源变压器在正、负半周内都有电流供给负载，电源变压器利用效率较高。

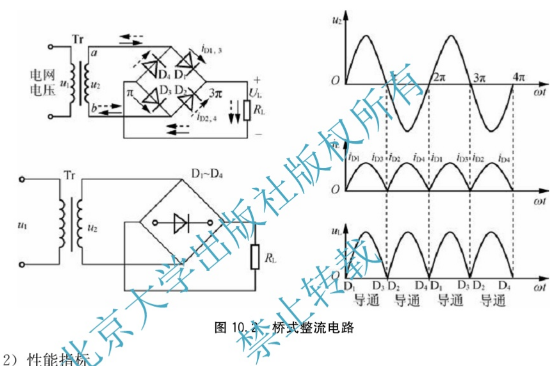


图 10.2　桥式整流电路

2）性能指标

（1）负载电阻上的直流电压 U_L。

U_L 定义为整流输出电压 u_L 在一个周期内的平均值：

$$U_L = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} u_L \mathrm{d}\omega t = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin\omega t = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}U_2 \approx 0.9U_2$$

上式也可用傅里叶级数对 u_L 的波形进行分解后得到，即

$$u_L = \sqrt{2}U_2\left(\frac{2}{\pi} - \frac{4}{3\pi}\cos 2\omega t - \frac{4}{15\pi}\cos 4\omega t - \cdots\right)$$

式中：直流分量即为负载电压 u_L 的平均值。

3. 电容滤波电路

电路如图 10.3 所示。

1）负载 R_L 未接入时

u_2 为正半周时，u_2 通过 D_1、D_3 向电容器 C 充电。

u_2 为负半周时，经 D_2、D_4 向电容器 C 充电。

充电时间常数为 $\tau_c = R_{int}C$。

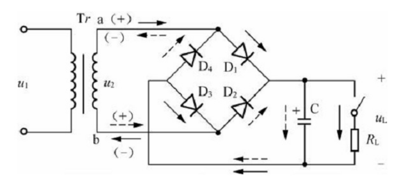


图 10.3　桥式整流、电容滤波电路

R_{int}包括变压器副绕组的直流电阻和二极管D的正向电阻，R_{int}一般很小，电容器很快就充电到$\sqrt{2}U_2$。

电容器无放电回路，故输出电压(即电容器C两端的电压u_C)保持在$\sqrt{2}U_2$，输出为一个恒定的直流。

2）接入负载R_L

设u_2从0开始上升(即正半周开始)时接入负载R_L，此时$u_2>u_C$，二极管D_1、D_3导通，u_2经D_1、D_3一方面向负载R_L供电，另一方面向电容器C充电，u_C随着交流电压u_2升高到接近最大值。然后，u_2又按正弦规律下降。当$u_2<u_C$时，二极管受反向电压作用而截止，电容器C又经R_L放电。电容器C如此周而复始地进行充放电，负载上便得到近似锯齿波的电压$u_L=u_C$。

3）性能指标

C值一定，当$R_L=\infty$即空载时，$U_L=\sqrt{2}U_2=1.4U_2$。

当$C=0$，即无电容时，$U_L=0.9U_2$。

在整流电路的内阻不太大(几欧)和放电时间常数满足$\tau_d=R_LC\geqslant(3\sim5)\dfrac{T}{2}$的关系时，$U_L=(1.1\sim1.2)V_2$。

10.1.2　串联反馈式稳压电路

稳压电路的主回路是起调整作用的BJT与负载串联，故称为串联式稳压电路，电路如图10.4所示。

输出电压的变化量由反馈网络取样经放大电路控制调整管T的c－e极间的电压降，达到稳定输出电压目的。

稳压原理：输入电压U_i增加(或负载电流I_o减小)时，导致输出电压U_o增加，反馈电压$U_f=\dfrac{R_2}{R_1+R_2}U_o=F_VU_o$也增加($F_V$为反馈系数)。$U_f$与基准电压$U_{REF}$相比较，其差值电压经比较放大电路放大后使$U_B$和$I_C$减小，调整管T的$U_{CE}$增大，使$U_o$下降，维持$U_o$基本恒定。

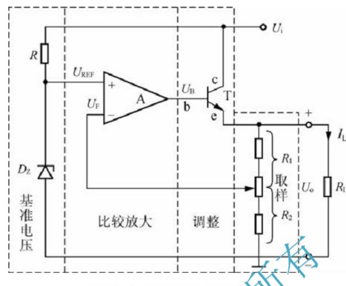


图 10.4　串联反馈式稳压电路

从反馈放大电路的角度来看，调整管 T 连接成电压跟随器，在深度负反馈条件下，$U_o=(1+\frac{R_1}{R_2})U_{REF}$，调整管 T 的调整作用是依靠 U_f 和 U_{REF} 之间的偏差来实现的，系统是一个闭环有差调整系统。当反馈越深时，调整作用越强，输出电压 U_o 也越稳定，电路的稳压系数和输出电阻 R_o 也越小。

10.1.3　三端集成稳压器

1. 种类

电子设备中常使用输出电压固定的集成稳压器，由于它只有输入、输出和公共引出端，故称为三端固定稳压器，如图 10.5 所示。

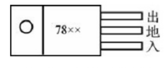


图 10.5　三端集成稳压器

78××系列输出为正电压，输出电流可达 1A，78L××系列和 78M××系列的输出电流分别为 0.1A 和 0.5A。

输出电压分别为 5V、6V、9V、12V、15V、18V 和 24V 等 7 档。

79××系列输出为负电压。

2. 应用

图 10.6(a)所示是应用 78L××输出固定电压 U_o 的典型电路图。正常工作时，输入、输出电压差应大于 2～3V。电路中接入电容 C_1、C_2 以实现频率补偿，防止稳压器产生高



频自激振荡并抑制电路引入的高频干扰。C_3是电解电容，可减小稳压电源输出端由输入电源引入的低频干扰。D是保护二极管，当输入端意外短路时，给C_3＝一个放电通路，防止C_3两端电压造成调整管be结击穿。

图10.6(b)所示是扩大78L××输出电流的电路。电路中加入了功率BJT T_1，向输出端提供额外的电流I_{o1}，使输出电流增加为$I_o = I_{o1} + I_{o2}$。

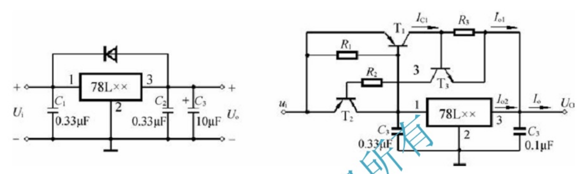


图10.6　三端稳压器应用

过流保护功能工作原理如下所述。

正常工作时，T_2、T_3截止，电阻R_1上的电流产生压降使T_1导通，并使输出电流增加。若I_o过流，则I_{o1}也增加，电流检测电阻R_3上压降增大使T_3导通，T_2趋于饱和，使T_1管U_{BE1}降低，限制了功率管T_1的电流I_{C1}，保护功率管不致因过流而损坏。正、负输出电压可调的稳压器如图10.7所示。

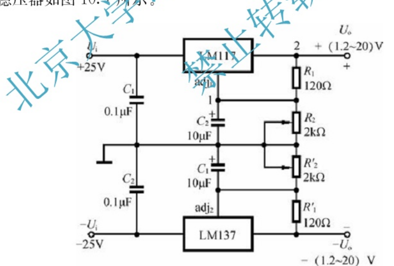


图10.7　正、负输出电压可调的稳压器

10.2　典型例题分析

例题1：变压器副边有中心抽头的全波整流电路如图10.8所示，副边电源电压为$u_{2a} = -u_{2b} = \sqrt{2}U_2\sin\omega t$，假定忽略管子的正向压降和变压器内阻。①试画出$u_{2a}$、$u_{2b}$、$i_{D1}$、$i_{D2}$、



i_L、u_L 及二极管承受的反向电压 u_R 的波形；②已知 U_2(有效值)，求 U_L、I_L(均为平均值)；③计算整流二极管的平均电流 I_D、最大反向电压 U_{RM}；④若已知 $U_L=30V$，$I_L=80mA$，试计算 U_{2a}、U_{2b}的值，并选择整流二极管。

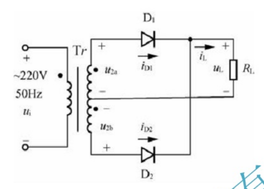


图 10.8　全波整流电路图

解：(1) u_{2a}、u_{2b}、i_{D1}、i_{D2}、i_L、u_L 及二极管的反向电压 u_R 的波形如图 10.9 所示。

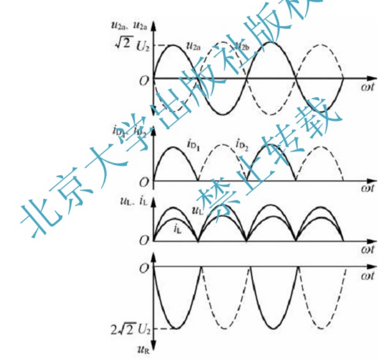


图 10.9　例题 1 图

(2) 负载电压 U_L和负载电流 I_L(平均值)。

$$U_L=\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}u_L\mathrm{d}(\omega t)=\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}\sqrt{2}U_2\sin\omega t\,\mathrm{d}(\omega t)=0.9U_2$$

$$I_L=\frac{U_L}{R_L}=\frac{0.9U_2}{R_L}$$

(3) 整流二极管的平均电流 I_D和最大反向电 U_{RM}。

$$I_D=\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\frac{u_L}{R_L}\mathrm{d}(\omega t)=\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\frac{\sqrt{2}U_2}{R_L}\sin\omega t\,\mathrm{d}(\omega t)=\frac{I_L}{2}$$



$$U_{RM}=2\sqrt{2}U_2$$

$U_L=30V$，$I_L=80mA$ 时，

$$U_{2a}=U_{2b}=\frac{U_L}{0.9}=1.11\times30V=33.3V。$$

此时二极管电流为

$$I_D=\frac{I_L}{2}=\frac{80mA}{2}=40mA$$

$$U_{RM}=2\sqrt{2}\times33.3V=94.2V$$

选用 2CP6A($I_{DM}=100mA$，$U_{RM}=100V$)。

例题 2：桥式整流、电容滤波电路如图 10.10 所示，已知交流电源电压 $U_1=200V$，$f=50Hz$，$R_L=50\Omega$，要求输出直流电压为 24V，纹波较小。①选择整流管的型号；②选择滤波电容器(容量和耐压)；③确定电源变压器的二次电压和电流。

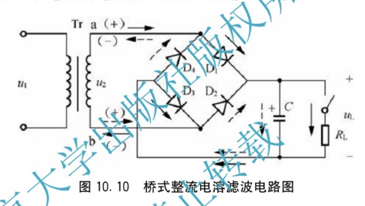


图 10.10 桥式整流电容滤波电路图

解：① 选择整流管的型号，通过二极管的平均电流和二极管承受的最大反向电压分别为

$$I_D=\frac{U_L}{2R_L}=\frac{24V}{2\times50\Omega}=0.24A=240mA$$

$$U_2=\frac{U_L}{1.1\sim1.2}$$

取
$$U_2=\frac{24V}{1.2}=20V$$

$$U_{RM}=\sqrt{2}U_2=\sqrt{2}\times20V=28.2V$$

选 2CP1D($I_{DM}=500mA$，$U_{RM}=100V$)。

② 选择滤波电容器(容量和耐压)为

$$\tau_d=R_LC\geqslant(3\sim5)\frac{T}{2}=\frac{3\sim5}{2f}=\frac{3\sim5}{2\times50Hz}=(3\sim5)\times0.01s$$

取 $\tau_d=0.05s$，$C=\tau_d/R_L=(0.05/50)F=1000\mu F$，要求电容耐压$>U_{RM}=\sqrt{2}U_2=28.2V$，故选择 $1000\mu F/50V$ 的电解电容器。

③ 变压器二次电压 U_2 和电流 I_2 为

$$U_2=24V/1.2=20V，I_2=(1.5\sim2)I_L=(1.5\sim2)\times2I_D$$

取 $I_2 = 1.5I_L = (1.5\times240\times2)\text{mA} = 720\text{mA}$。

例题 3：如图 10.11 所示倍压整流电路，试标出每个电容器上的电压和二极管承受的最大反向电压，求输出电压 U_{L1}、U_{L2} 的大小，并标出极性。

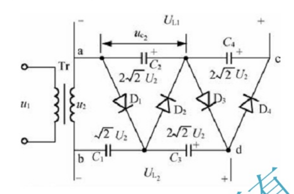


图 10.11　倍压整流电路

解：每个电容器上承受的最大电压为

u_2 正半周（a 端正 b 端负）D_1 导通，C_1 两端电压最大值为 $U_{C_1}=\sqrt{2}U_2$。

u_2 负半周，D_2 导通，U_2 和 C_1 两端电压一起通过 D_2 对 C_2 充电，C_2 两端电压的最大值为 $U_{C_2}=\sqrt{2}U_2+U_{C_1}=2\sqrt{2}U_2$。

u_2 正半周，D_3 导通，同理，C_3 两端电压最大值为 $U_{C_3}=\sqrt{2}U_2+U_{C_2}-U_{C_1}=2\sqrt{2}U_2$。

u_2 负半周，D_4 导通，C_4 两端电压最大值为 $U_{C_4}=\sqrt{2}U_2+U_{C_1}+U_{C_3}-U_{C_2}=2\sqrt{2}U_2$。

二极管承受的最大反向电压 $U_{RM}=2\sqrt{2}U_2$。

ac 两端电压 $U_{L1}=U_{C_2}+U_{C_4}=4\sqrt{2}U_2$。

bd 两端电压 $U_{L2}=U_{C_1}+U_{C_3}=3\sqrt{2}U_2$。

例题 4：电路如图 10.12 所示，稳压管 D_z 的稳定电压 $U_z=6\text{V}$，$U_I=18\text{V}$，$C=1000\text{pF}$，$R=R_L=1\text{k}\Omega$。①电路中稳压管接反或限流电阻 R 短路，会出现什么现象？②求变压器副边电压有效值 U_2、输出电压 U_o 的值？③若稳压管 D_z 的动态电阻 $r_z=20\Omega$，求稳压电路的内阻 R_o 及 $\Delta U_o/\Delta U_i$ 的值；④若电容器 C 断开，试画 U_i、U_o 及电阻 R 两端电压 U_R 的波形。

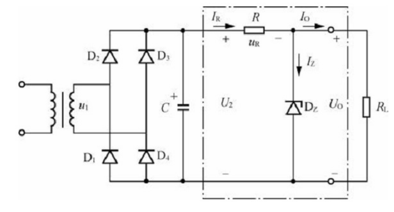


图 10.12　例题 4 图



解： ① 稳压管 D_Z 接反使 U_o降低到约为 0.7V；而限流电阻 R 短路，$r_Z \ll R_L$，I_R 电流过大，使 I_Z电流超过允许值会使稳压管烧坏。

② $U_o = U_z = 6V$，取 $U_2 = U_1/1.2 = 18V/1.2 = 15V$，$U_{2M} = \sqrt{2}U_2 = 21V$。

③ $r_Z = 20\Omega$，$R = 1k\Omega$，稳压电路内阻 $R_o = r_Z \parallel R \approx r_Z = 20\Omega$，

一般 $R_L \gg R_Z$，所以$\dfrac{\Delta U_o}{\Delta U_i} = \dfrac{r_Z \parallel R_L}{R + r_Z \parallel R_L} \approx \dfrac{r_Z}{R + r_Z} = 0.02$。

④ 电容器 C 断开，u_i、u_o及电阻 R 两端电压 u_R 的波形如图 10.13 所示，其中 $u_i = u_o + u_R$。

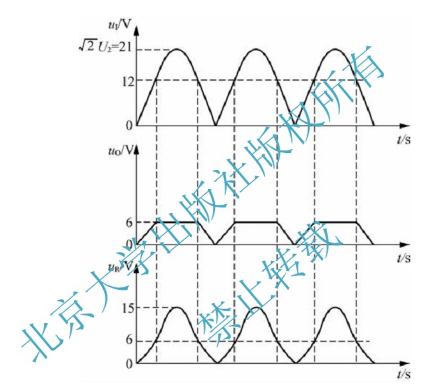


图 10.13　u_I，u_O，u_R 的波形图

10.3 自　测　题

自测题一： 判断下列说法是否正确。

（1）直流电源是一种将正弦信号转换为直流信号的波形变换电路。　　（　　）

（2）直流电源是一种能量转换电路，它将交流能量转换为直流能量。　　（　　）

（3）在变压器副边电压和负载电阻相同的情况下，桥式整流电路的输出电流是半波整流电路输出电流的 2 倍。因此，它们的整流管的平均电流比值为 2∶1。　　（　　）

（4）若 U_2为电源变压器副边电压的有效值，则半波整流电容滤波电路和全波整流电容滤波电路在空载时的输出电压均为$\sqrt{2}U_2$。　　（　　）

（5）当输入电压 U_i和负载电流 I_L变化时，稳压电路输出电压是绝对不变的。　　（　　）

（6）一般情况下，开关型稳压电路比线性稳压电路效率高。（　　）

（7）整流电路可将正弦电压变为脉动的直流电压。（　　）

（8）电容滤波电路适用于小负载电流，而电感滤波电路适用于大负载电流。（　　）

（9）在单相桥式整流电容滤波电路中，若有一只整流管断开，则输出电压平均值会变为原来的一半。（　　）

（10）对于理想的稳压电路，$\Delta U_o/\Delta U_i=0$，$R_o=0$。（　　）

（11）线性直流电源中的调整管工作在放大状态，开关型直流电源中的调整管工作在开关状态。（　　）

（12）因为串联型稳压电路中引入了深度负反馈，因此也可能产生自激振荡。（　　）

（13）在稳压管稳压电路中，稳压管的最大稳定电流必须大于最大负载电流。（　　）

而且，其最大稳定电流与最小稳定电流之差应大于负载电流的变化范围。（　　）

解：（1）×　（2）√　（3）√ ×　（4）√　（5）×　（6）√　（7）√　（8）√　（9）×（10）√　（11）√　（12）√　（13）×√

自测题二：选择或填写正确答案。

（1）选择题。

① 整流的目的是 ________。

A. 将交流变为直流　B. 将高频变为低频　C. 将正弦波变为方波

② 在单相桥式整流电路中，若有一只整流管接反，则 ________。

A. 输出电压约为 $2U_D$　B. 变为半波直流　C. 整流管将因电流过大而烧坏

③ 直流稳压电源中滤波电路的目的是 ________。

A. 将交流变为直流　B. 将高频变为低频

C. 将交、直流混合量中的交流成分滤掉

④ 滤波电路应选用 ________。

A. 高通滤波电路　B. 低通滤波电路　C. 带通滤波电路

⑤ 若要组成输出电压可调、最大输出电流为 3A 的直流稳压电源，则应采用 ________。

A. 电容滤波稳压管稳压电路　B. 电感滤波稳压管稳压电路

C. 电容滤波串联型稳压电路　D. 电感滤波串联型稳压电路

⑥ 串联型稳压电路中的放大环节所放大的对象是 ________。

A. 基准电压　B. 采样电压　C. 基准电压与采样电压之差

⑦ 开关型直流电源比线性直流电源效率高的原因是 ________。

A. 调整管工作在开关状态

B. 输出端有 LC 滤波电路

C. 可以不用电源变压器

⑧ 在脉宽调制式串联型开关稳压电路中，为使输出电压增大，对调整管基极控制信

号的要求是 ________。

A. 周期不变，占空比增大

B. 频率增大，占空比不变

C. 在一个周期内，高电平时间不变，周期增大

解：①A　②C　③C　③B　⑤D　⑥C　⑦A　⑧A

（2）填空。

在图 10.14 所示电路中，调整管为 ________，采样电路由________组成，基准电压电路由________组成，比较放大电路由________组成，保护电路由________组成；输出电压最小值的表达式为________，最大值的表达式为________。

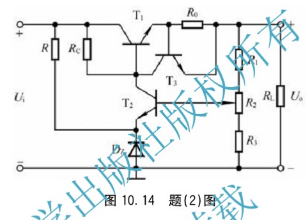


图 10.14　题(2)图

解： T_1，R_1、R_2、R_3；R、D_Z，T_2、R_c，R_0、T_3；

$$\frac{R_1+R_2+R_3}{R_2+R_3}(U_Z+U_{BE2}),\ \frac{R_1+R_2+R_3}{R_3}(U_Z+U_{BE2})。$$

自测题三： 分析计算题。

（1）在图 10.15 所示稳压电路中，已知稳压管的稳定电压 U_Z 为 6V，最小稳定电流 I_{Zmin} 为 5mA，最大稳定电流 I_{Zmax} 为 40mA；输入电压 U_i 为 15V，波动范围为±10%；限流电阻 R 为 200Ω。

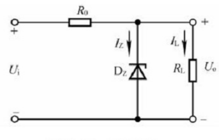


图 10.15　题(1)图

① 电路是否能空载？为什么？

② 作为稳压电路的指标，负载电流 I_L 的范围为多少？

解： ① 由于空载时稳压管流过的最大电流为

$$I_{DZmax}=I_{Rmax}=\frac{U_{Imax}-U_Z}{R}=52.5\text{mA}>I_{Zmax}=40\text{mA}$$

所以电路不能空载。

② 根据 $I_{DZmin}=\frac{U_{Imin}-U_Z}{R}-I_{Lmax}$，负载电流的最大值为

$$I_{Lmax}=\frac{U_{Imin}-U_Z}{R}-I_{DZmin}=32.5\text{mA}$$

根据 $I_{DZmax}=\frac{U_{Imax}-U_Z}{R}-I_{Lmin}$，负载电流的最小值为

$$I_{Lmin}=\frac{U_{Imax}-U_Z}{R}-I_{DZmax}=12.5\text{mA}$$

所以，负载电流的范围为 12.5～32.5mA。

(2) 电路如图 10.16 所示，合理连线，构成 5V 的直流电源。

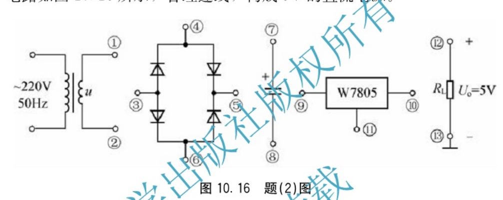


图 10.16 题(2)图

解：①接④，②接⑥，⑤接⑦、⑨，③接⑧、⑪、⑬，⑩接⑫，如图 10.17 所示。

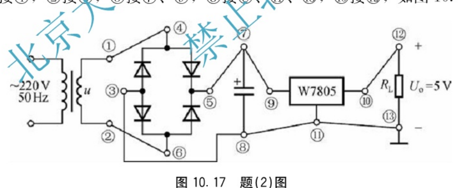


图 10.17 题(2)图

10.4 练 习 题

(1) 电路如图 10.18 所示，变压器副边电压有效值为 $2U_2$。

① 画出 u_2、u_{D1} 和 u_o的波形。

② 求出输出电压平均值 $U_{o(AV)}$ 和输出电流平均值 $I_{L(AV)}$ 的表达式。

③ 二极管的平均电流 $I_{D(AV)}$ 和所承受的最大反向电压 U_{Rmax} 的表达式。

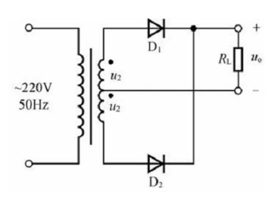


图 10.18　题(1)图

（2）电路如图 10.19 所示，变压器副边电压有效值 $U_{21}=50V$，$U_{22}=20V$。试问

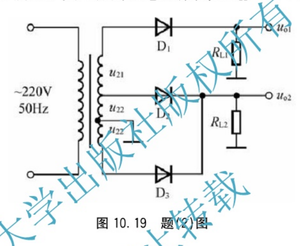


图 10.19　题(2)图

① 输出电压平均值 $U_{o1(AV)}$ 和 $U_{o2(AV)}$ 各为多少？

② 各二极管承受的最大反向电压为多少？

（3）电路如图 10.20 所示。

① 分别标出 u_{o1} 和 u_{o2} 对地的极性。

② u_{o1}、u_{o2} 分别是半波整流还是全波整流？

③ 当 $U_{21}=U_{22}=20V$ 时，$U_{o1(AV)}$ 和 $U_{o2(AV)}$ 各为多少？

④ 当 $U_{21}=18V$，$U_{22}=22V$ 时，画出 u_{o1}、u_{o2} 的波形，并求出 $U_{o1(AV)}$ 和 $U_{o2(AV)}$ 各为多少？

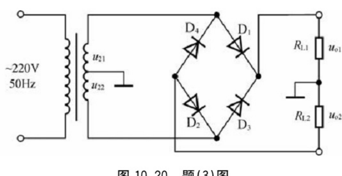


图 10.20　题(3)图

（4）分别判断图 10.21 所示各电路能否作为滤波电路，简述理由。



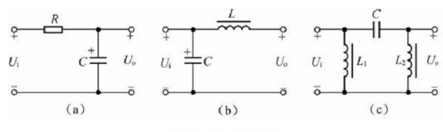


图 10.21 题(4)图

(5) 试在图 10.22 所示电路中，标出各电容两端电压的极性和数值，并分析负载电阻上能够获得几倍压的输出。

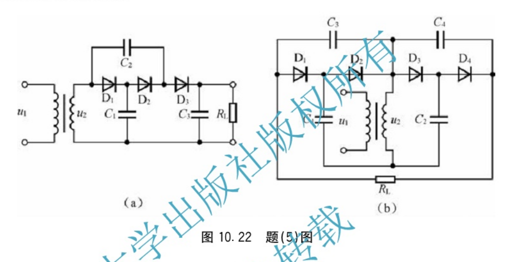


图 10.22 题(5)图

(6) 电路如图 10.23 所示，已知稳压管的稳定电压为 6V，最小稳定电流为 5mA，允许耗散功率为 240mW，动态电阻小于 15Ω。试问

① 当输入电压为 20～24V、R_L为 200～600Ω 时，限流电阻 R 的选取范围是多少？

② 若 R＝390Ω，则电路的稳压系数 S_r为多少？

(7) 电路如图 10.24 所示，已知稳压管的稳定电压为 6V，最小稳定电流为 5mA，允许耗散功率为 240mW，输入电压为 20～24V，R_1＝360Ω。试问

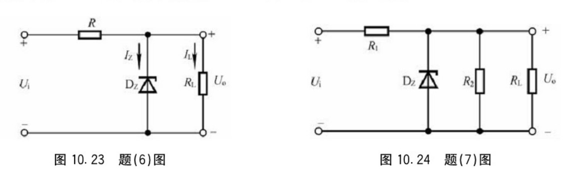


图 10.23 题(6)图　　　图 10.24 题(7)图

① 为保证空载时稳压管能够安全工作，R_2应选多大？

② 当 R_2按上面原则选定后，负载电阻允许的变化范围是多少？

(8) 电路如图 10.25 所示，稳压管的稳定电压 U_Z＝4.3V，晶体管的 U_{BE}＝0.7V，R_1＝R_2＝R_3＝300Ω，R_0＝5Ω。试估算



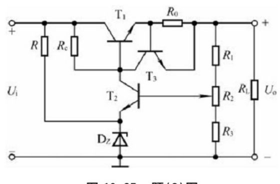


图 10.25　题(8)图

① 输出电压的可调范围。

② 调整管发射极允许的最大电流。

③ 若 $U_i=25V$，波动范围为±10%，则调整管的最大功耗为多少。

(9) 电路如图 10.26 所示，已知稳压管的稳定电压 $U_Z=6V$，晶体管的 $U_{BE}=0.7V$，$R_1=R_2=R_3=300\Omega$，$U_i=24V$。判断出现下列现象时，分别是因为电路产生了什么故障(即哪个元件开路或短路)。

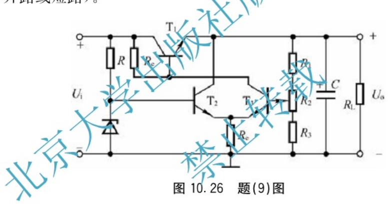


图 10.26　题(9)图

① $U_o\approx24V$；②$U_o\approx23.3V$；③$U_o\approx12V$ 且不可调；④$U_o\approx6V$ 且不可调；⑤U_o可调范围变为 6～12V。

(10) 直流稳压电源如图 10.27 所示。

① 说明电路的整流电路、滤波电路、调整管、基准电压电路、比较放大电路、采样电路等部分各由哪些元件组成。

② 标出集成运放的同相输入端和反相输入端。写出输出电压的表达式。

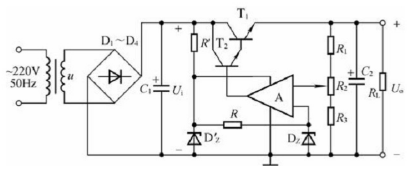


图 10.27　直流稳压电源

(11) 电路如图10.28所示，设 $I'_i \approx I'_o = 1.5A$，晶体管T的 $U_{EB} \approx U_D$，$R_1 = 1\Omega$，$R_2 = 2\Omega$，$I_D \gg I_B$。求解负载电流 I_L 与 I'_o 的关系式。

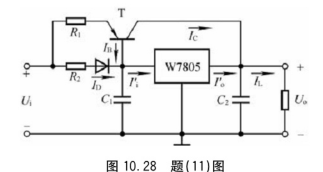


图10.28 题(11)图

(12) 在图10.29所示电路中，$R_1 = 240\Omega$，$R_2 = 3k\Omega$；W117输入端和输出端电压允许范围为3～40V，输出端和调整端之间的电压 U_R 为1.25V。试求解：①输出电压的调节范围；②输入电压允许的范围。

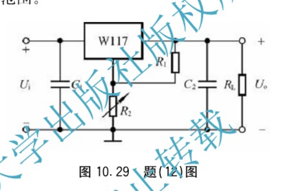


图10.29 题(12)图

(13) 试分别求出图10.30所示各电路输出电压的表达式。

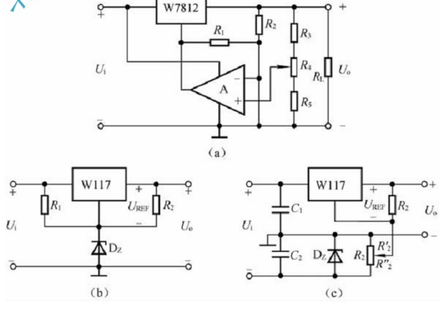


图10.30 题(13)图

(14) 两个恒流源电路分别如图10.31(a)、(b)所示。

① 求解各电路负载电流的表达式。

② 设输入电压为 20V，晶体管饱和压降为 3V，be 间电压数值 $|U_{BE}|=0.7V$；W7805 输入端和输出端间的电压最小值为 3V；稳压管的稳定电压 $U_Z=5V$；$R_1=R=50\Omega$。分别求出两电路负载电阻的最大值。

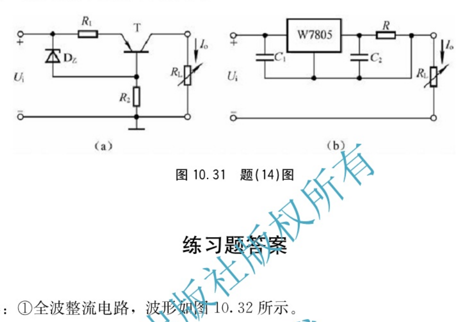


图 10.31 题(14)图

练习题答案

(1) 解：①全波整流电路，波形如图 10.32 所示。

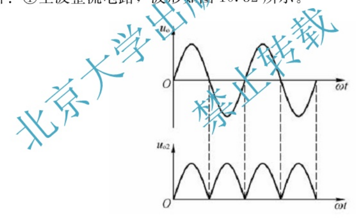


图 10.32 题(1)图

② 输出电压平均值 $U_{o(AV)}$ 和输出电流平均值 $I_{L(AV)}$ 为

$$U_{o(AV)}\approx 0.9U_2,\ I_{L(AV)}\approx\frac{0.9U_2}{R_L}$$

③ 二极管的平均电流 $I_{D(AV)}$ 和所承受的最大反向电压 U_R 为

$$I_D\approx\frac{0.45U_2}{R_L},\ U_R=2\sqrt{2}U_2$$

(2) 解：①输出电压分别为 $U_{o1}\approx 0.45(U_{21}+U_{22})=31.5V$，$U_{o2}\approx 0.9U_{22}=18V$。

② D_1 的最大反向电压 $U_R>\sqrt{2}(U_{21}+U_{22})\approx 99V$，$D_2$、$D_3$ 的最大反向电压 $U_R>2\sqrt{2}U_{22}\approx 57V$。

(3) 解：① 均为上“＋”下“－”。

② 均为全波整流。

③ $U_{o1(AV)}$和$U_{o2(AV)}$为$U_{o1(AV)}=-U_{o2(AV)}\approx 0.9U_{21}=0.9U_{22}=18\text{V}$。

④ u_{o1}、u_{o2}的波形如图 10.33 所示。它们的平均值为

$$U_{o1(AV)}=-U_{o2(AV)}\approx 0.45U_{21}+0.45U_{22}=18\text{V}。$$

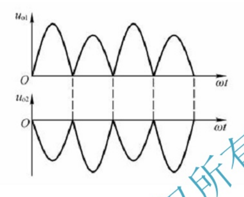


图 10.33 U_{o1}、U_{o2}波形图

(4) 解：图 10.21(a)、(b)所示电路可用于滤波，图 10.21(c)所示电路不能用于滤波。

因为电感对直流分量的电抗很小，对交流分量的电抗很大，所以在滤波电路中应将电感串联在整流电路的输出和负载之间。因为电容对直流分量的电抗很大，对交流分量的电抗很小，所以在滤波电路中应将电容并联在整流电路的输出或负载上。

(5) 解：在图 10.22(a)所示电路中，C_1上电压极性为上“+”下“−”，数值为一倍压；C_2上电压极性为右“+”左“−”，数值为二倍压；C_3上电压极性为上“+”下“−”，数值为三倍压。负载电阻上为三倍压。

在图 10.22(b)所示电路中，C_1上电压极性为上“−”下“+”，数值为一倍压；C_2上电压极性为上“+”下“−”，数值为一倍压；C_3、C_4上电压极性均为右“+”左“−”，数值均为二倍压。负载电阻上为四倍压。

(6) 解：①因为$I_{Z\max}=P_{ZM}/U_Z=40\text{mA}$，$I_L=U_Z/R_L=10\sim 30\text{mA}$，所以$R$的取值范围为$R_{\max}=\dfrac{U_{I\min}-U_Z}{I_Z+I_{L\max}}=400\Omega$，$R_{\min}=\dfrac{U_{I\max}-U_Z}{I_{Z\max}+I_{L\min}}=360\Omega$。

② 稳压系数为

$$S_r\approx\frac{r_Z}{R}\cdot\frac{U_i}{U_Z}\approx 0.154$$

(7) 解：R_1中的电流和稳压管中的最大电流为

$$I_{R1}=\frac{U_i-U_Z}{R_1}\approx 39\sim 50\text{mA},\quad I_{Z\max}=\frac{P_{ZM}}{U_Z}=40\text{mA}$$

为保证空载时稳压管能够安全工作，

$$R_2=\frac{U_Z}{(I_{R1\max}-I_{Z\max})}=600\Omega$$

负载电流的最大值为



$$I_{Lmax}=I_{R1min}-I_{R2}-I_{Zmin}=24mA$$

负载电阻的变化范围为

$$R_{Lmin}=\frac{U_Z}{I_{Lmax}}=250\Omega，R_{Lmin}=\infty$$

(8) 解：① 基准电压 $U_R=U_Z+U_{BE}=5V$，输出电压的可调范围为

$$U_o=\frac{R_1+R_2+R_3}{R_2+R_3}\cdot U_Z\sim\frac{R_1+R_2+R_3}{R_3}\cdot U_Z=7.5\sim15V$$

② 调整管发射极最大电流为

$$I_{Emax}=U_{BE}/R_0\approx140mA$$

③ 调整管的最大管压降和最大功耗分别为

$$U_{CEmax}=U_{imax}-U_{omin}=20V$$

$$P_{Tmax}\approx I_{Emax}U_{CEmax}\approx2.8W$$

(9) 解：①T_1的 c、e 短路；②R_c短路；③R_2短路；④T_2的 b、c 短路；⑤R_1短路。

(10) 解：①整流电路：$D_1\sim D_4$；滤波电路：C_1；调整管：T_1、T_2；基准电压电路：R'、D_Z'、R、D_Z；比较放大电路：A；取样电路：R_1、R_2、R_3。

② 为了使电路引入负反馈，集成运放的输入端上为“－”下为“＋”。

③ 输出电压的表达式为

$$\frac{R_1+R_2+R_3}{R_2+R_3}\cdot U_Z\leqslant U_o\leqslant\frac{R_1+R_2+R_3}{R_3}\cdot U_Z$$

(11) 解：因为 $U_{EB}\approx U_D$，$I_ER_1\approx I_DR_2\approx I_i'R_2\approx I_o'R_2$，$I_C\approx I_E$，$I_C\approx I_E$，所以 $I_C\approx\frac{R_2}{R_1}\cdot I_o'$，$I_L\approx(1+\frac{R_2}{R_1})\cdot I_o'=4.5A$。

(12) 解：①输出电压的调节范围为

$$U_o\approx(1+\frac{R_2}{R_1})U_{REF}=1.25\sim16.9V$$

② 输入电压取值范围为

$$U_{imin}=U_{omax}+U_{12min}\approx20V$$

$$U_{imax}=U_{omin}+U_{12max}\approx41.25V$$

(13) 解：在图 10.30(a)所示电路中，W7812 的输出为 U_{REF}，基准电压为

$$U_R=\frac{R_2}{R_1+R_2}\cdot U_{REF}$$

输出电压的表达式为

$$\frac{R_3+R_4+R_5}{R_3+R_4}\cdot U_R\leqslant U_o\leqslant\frac{R_3+R_4+R_5}{R_3}\cdot U_R$$

在图 10.30(b)所示电路中，输出电压的表达式为

$$U_o=U_Z+U_{REF}=U_Z+1.25V$$

在图 10.30(c)所示电路中，输出电压的表达式为

$$U_o = U_{REF} - \frac{R_2'}{R_2} \cdot U_Z = U_{REF} \sim (U_{REF} - U_Z)$$

(14) 解：①设图 10.31(b)中 W7805 的输出电压为 U_o'。图示两个电路输出电流的表达式分别为

图 10.31(a)：$I_o = \frac{U_Z - U_{EB}}{R_1}$；图 10.31(b)：$I_o = \frac{U_o'}{R}$。

② 两个电路输出电压的最大值、输出电流和负载电阻的最大值分别为

图 10.31(a)：$U_{omax} = U_i - (U_Z - U_{EB}) - (-U_{CES}) = 12.3\text{V}$

$I_o = 86\text{mA}$

$R_{Lmax} = \frac{U_{omax}}{I_o} \approx 143\Omega$

图 10.31(b)：$U_{omax} = U_i - U_{12} = 17\text{V}$

$I_o = 100\text{mA}$

$R_{Lmax} = \frac{U_{omax}}{I_o} = 170\Omega$

第 11 章

综合习题集

一、填空题

1. 杂质半导体有________型和________型之分。

2. PN 结最重要的特性是________，它是一切半导体器件的基础。

3. PN 结的空间电荷区变厚，是由于 PN 结加了________电压，PN 结的空间电荷区变窄，是由于 PN 结加的是________电压。

4. N 型半导体中多数载流子是________，P 型半导体中多数载流子是________，PN 结具有________特性。

5. 发射结________偏置，集电结________偏置，则三极管处于饱和状态。

6. P 型半导体中空穴为________载流子，自由电子为________载流子。

7. PN 结正偏时________，反偏时________，所以 PN 结具有________导电性。

8. 反向电流是由________载流子形成，其大小与________有关，而与外加电压________。

9. 三极管是________控制元件，场效应管是________控制元件。

10. 当温度升高时，三极管的集电极电流 I_c________，发射结压降 U_{BE}________。

11. 晶体三极管具有放大作用时，发射结________，集电结________。

12. 漂移电流是________电流，它由________载流子形成，其大小与________有关，而与外加电压________。

13. 放大电路中基极偏置电阻 R_b 的作用是________。

14. 两级放大电路的第一级电压放大倍数为 100，即电压增益为________ dB，第二级电压增益为 26dB，则两级总电压增益为________ dB。

15. 由偶数级共射电路组成的多级放大电路中，输入和输出电压的相位________，由奇数级组成的多级放大电路中，输入和输出电压的相位________。

16. 电压负反馈稳定的输出量是________，使输出电阻________，电流负反馈稳定的输出量________，使输出电阻________。

17. 稳压二极管是利用二极管的________特性工作的。

18. 晶闸管阳极和阴极间加________，控制极加适当的________，晶闸管才能导通。

19. 在输入单相半波整流电路中，二极管承受的最大反向电压为U_{RM}________，负载电压为U_o________。

20. 甲类功放的最大缺点是________。

21. 双极型三极管是________控制器件，场效应管是________控制器件；结型场效应管的栅源极之间必须加________偏置电压，才能正常放大工作。

22. 差分电路的两个输入端电压分别为$U_{i1}=2.00$V，$U_{i2}=1.98$V，则该电路的差模输入电压U_{id}为________ V，共模输入电压U_{ic}为 ________ V。

23. 在放大电路中为了提高输入电阻应引入 ________负反馈，为了降低输出电阻应引入________负反馈。

24. 为了稳定三极管放大电路的静态工作点，应采用________负反馈，为了稳定交流输出电流，应采用________负反馈。

25. 负反馈放大电路和放大倍数$A_f=$________，深度负反馈放大电路的放大倍数$A_f=$________。

26. 带有负反馈放大电路的频带宽度$BW_f=$________ BW，________称为反馈深度。

27. 差分放大电路输入端加上大小相等、极性相同的两个信号，称为 ________信号，而加上大小相等．极性相反的两个信号，称为________信号。

28. 为了消除乙类互补功率放大器输出波形的________失真，应采用________类互补功率放大器。

29. OCL 电路是________电源互补功率放大电路；OTL 电路是________电源互补功率放大电路。

30. 共集电极放大电路具有电压放大倍数________，输入电阻________，输出电阻________等特点，所以常用在输入级、输出级或缓冲级。

31. 差分放大电路能够抑制 ________漂移，也称________漂移，所以它广泛应用于________电路中。

32. 为了稳定三极管放大电路和静态工作点，应采用 ________负反馈，为了减小输出电阻，应采用________负反馈。

33. 乙类互补功放存在________失真，可以利用________类互补功放来克服。

34. 要保证振荡电路满足相位平衡条件，必须具有________网络。

35. 现有基本放大电路：①共射放大电路，②共基放大电路，③共集放大电路，④共源放大电路。一般情况下，上述电路中输入电阻最大的电路是________，输入电阻最小的电路是________，输出电阻最小的电路是________，频带最宽的电路是________；既能放大电流，又能放大电压的电路是 ________；只能放大电流，不能放大电压的电路是________；只能放大电压，不能放大电流的电路是________。

36. 正弦波振荡电路按选频网络所用元件可分为________、________和________ 3 种电路，其中________振荡电路的振荡频率最为稳定。

37. 振荡电路的平衡条件是________，________反馈才能满足振荡电路的相位平衡条件。

二、判断题

1. 半导体中的空穴带正电。（　　）
2. 本征半导体温度升高后两种载流子浓度仍然相等。（　　）
3. P 型半导体带正电，N 型半导体带负电。（　　）
4. 未加外部电压时，PN 结中电流从 P 区流向 N 区。（　　）
5. 稳压管工作在反向击穿状态时，其两端电压恒为 U_z。（　　）
6. 若晶体管将集电极和发射极互换，则仍有较大的电流放大作用。（　　）
7. 对于增强型场效应管，当其栅源电压为 0 时不存在导电沟道。（　　）
8. MOS 管的直流输入电阻比结型场效应管的大。（　　）
9. 参数理想对称的双端输入双端输出差分放大电路只能放大差模信号，不能放大共模信号。（　　）
10. 长尾式差分放大电路，在差模交流通路中，射极电阻 R_E均可视为短路。（　　）
11. 只要将两个晶体管组成复合管就一定能提高管子的输入电阻。（　　）
12. 作为输出级的互补电路常采用共射接法。（　　）
13. 功率放大电路中，输出功率最大时功放管的管耗也最大。（　　）
14. 零点漂移就是静态工作点的漂移。（　　）
15. 产生零点漂移的原因主要是晶体管参数受温度的影响。（　　）
16. 只有直接耦合放大电路才有温漂。（　　）
17. 差模信号是差分放大电路两个输入端电位之差；（　　）共模信号是差分放大电路两个输入端电位之和。（　　）
18. 不管差分放大电路的参数是否理想对称，R_E均有共模负反馈作用；R_E越大，抑制温漂能力越强；（　　）因此，R_E可想取多大就取多大。（　　）
19. 差分放大电路采用恒流源代替 R_E是为了增大差模放大倍数。（　　）
20. 利用两只 NPN 型管构成的复合管只能等效为 NPN 型管。（　　）
21. 利用一只 NPN 型管和一只 PNP 型管构成的复合管只能等效为 PNP 型管。（　　）
22. 放大电路采用复合管是为了增大放大倍数和输入电阻。（　　）
23. 镜像电流源电路中两只晶体管的特性应完全相同。（　　）
24. 在差分放大电路中采用恒流源作集电极负载电阻能够增大差模放大倍数；同时，也可增大共模抑制比。（　　）
25. 只有输出与输入反相的放大电路，才可能引入负反馈。（　　）
26. 对交流信号有反馈作用的称为交流反馈，对直流信号有反馈作用的称为直流反馈。（　　）
27. 电压负反馈稳定输出电压，电流负反馈稳定输出电流。（　　）
28. 使输入量减小的反馈是负反馈，否则为正反馈。（　　）

29. 引入直流负反馈可以稳定静态工作点。 (　　)

30. 负反馈越深，电路的性能越稳定。 (　　)

31. 实现运算电路不一定非引入负反馈。 (　　)

32. 在运算电路中，同相输入端和反相输入端均为“虚地”。(　　)

33. 在深度负反馈条件下，运算电路依靠反馈网络实现输出电压和输入电压的某种运算。 (　　)

34. 由集成运放组成的有源滤波电路中一定引入了深度负反馈。 (　　)

35. 电压比较器电路中集成运放的净输入电流为零。 (　　)

36. 电压比较器将输入模拟信号转换为开关信号。 (　　)

37. 集成运放在开环情况下一定工作在非线性区。 (　　)

38. 同相比例运算电路中的集成运放有共模信号输入，而反相比例运算电路中的集成运放无共模信号输入。 (　　)

39. 凡是引入正反馈的集成运放，一定工作在非线性区。 (　　)

40. 电压比较器的阈值电压是使集成运放同相输入端电位和反相输入端电位相等的输入电压。 (　　)

41. 电压比较器输出端限幅电路中的稳压管不一定非加限流电阻不可。 (　　)

42. 只要引入正反馈，电路就会产生正弦波振荡。 (　　)

43. 具有选频网络的放大电路引入正反馈，就将产生正弦波振荡。 (　　)

44. 在组成正弦波振荡电路时，若没有稳幅环节，则输出电压幅值将为无穷大。 (　　)

45. RC 串并联网络既可作为选频网络，又可作为正反馈网络，与共射放大电路相接就将产生正弦波振荡。 (　　)

46. RC 串并联网络既可作为选频网络，又可作为正反馈网络，与共集放大电路相接就将产生正弦波振荡。 (　　)

47. RC 串并联网络既可作为选频网络，又可作为正反馈网络，与两级共射放大电路相接，并引入电压串联负反馈就将产生正弦波振荡。 (　　)

48. 只要满足相位平衡条件，电路就会产生正弦波振荡。 (　　)

49. 在振荡频率特别高时，应考虑正弦波振荡电路中的放大电路采用共基接法。 (　　)

50. 正弦波振荡电路的振荡频率应取决于选频网络，而不应取决于晶体管的极间电容、分布电容等。 (　　)

51. 桥式(文氏桥)RC 正弦波振荡电路的唯一特点是以 RC 串并联网络作为选频网络。 (　　)

52. 直流稳压电源是能量转换电路，其可将交流能量转换成直流能量。 (　　)

53. 在输出电压平均值相同的情况下，单相半波整流电路和单相桥式整流电路中二极管的平均电流相同。 (　　)



54. 直流稳压电源中的滤波电路是低通滤波电路。　　　（　　）

55. 在电网电压波动和负载电阻变化时，稳压电路的输出电压绝对不变。　　　（　　）

三、选择填空题

1. P型半导体中的多数载流子是________，N型半导体中的多数载流于是________。

A. 电子　　B. 空穴　　C. 正离子　　D. 负离子

2. 杂质半导体中少数载流子的浓度________本征半导体中载流子浓度。

A. 大于　　B. 等于　　C. 小于

3. 室温附近，当温度升高时，杂质半导体中________浓度明显增加。

A. 载流子　　B. 多数载流子　　C. 少数载流子

4. 硅二极管的正向导通压降比锗二极管________，反向饱和电流比锗二极管________。

A. 大　　B. 小　　C. 相等

5. 温度升高时，二极管在正向电流不变的情况下的正向电压________，反向电流________。

A. 增大　　B. 减小　　C. 不变

6. 工作在放大状态的晶体管，流过其发射结的是________电流，流过集电结的是________电流。

A. 扩散　　B. 漂移

7. 当晶体管工作在放大区时，各极电位关系为：NPN管的 u_C________ u_B________ u_E，PNP管的 u_C________ u_B________ u_E；工作在饱和区时，i_C________ βi_B；工作在截止区时，若忽略 I_{CBO} 和 I_{CEO}，则 i_B________ 0，i_C________ 0。

A. >　　B. <　　C. =

8. 三端集成稳压器CW7812的输出电压是（　　）。

A. 12V　　B. 5V　　C. 9V

9. 用直流电压表测得放大电路中某三极管各管脚电位分别是2V、6V、2.7V，则3个电极分别是________，该管是________型。

A. B、C、E　　B. C、B、E　　C. E、C、B　　D. PNP

E. NPN

10. 共射极放大电路的交流输出波形上半周失真时为________失真，下半周失真时为________失真。

A. 饱和　　B. 截止　　C. 交越　　D. 频率

11. 晶体管通过改变________来控制________；而场效应管是通过改变________控制________，它是一种________控制器件。

A. 基极电流　　B. 栅-源电压　　C. 集电极电流

D. 漏极电流　　E. 电压　　F. 电流

12. 晶体管电流由________形成，而场效应管的电流由________形成。因此晶体管电流受温度的影响比场效应管________。

A. 一种载流子　B. 两种载流子　C. 大　D. 小

13. JFET 和耗尽型 MOS 管在栅源电压为零时________导电沟道，而增强型 MOS 管则________导电沟道。

A. 存在　B. 不存在

14. 共射极放大电路的交流输出波形上半周失真时为________失真。共射极放大电路的交流输出波形下半周失真时为________失真。

A. 饱和　B. 截止　C. 交越　D. 频率

15. 差分放大电路是为了________而设置的。

A. 稳定 A_u　B. 放大信号　C. 抑制零点漂移

16. 共模抑制比是差分放大电路的一个主要技术指标，它反映放大电路________能力。

A. 放大差模抑制共模　B. 输入电阻高　C. 输出电阻低

17. 直接耦合放大电路的放大倍数越大，在输出端出现的零点漂移现象就越________。

A. 严重　B. 轻微　C. 和放大倍数无关

18. 电路的 A_d 越大表示________，A_c 越大表示________，K_{CMR} 越大表示________。

A. 温漂越大　B. 抑制温漂能力越强　C. 对差模信号的放大能力越强

19. 复合管组成的电路可以________。

A. 展宽频带　B. 提高电流放大系数　C. 减小温漂　D. 改变管子类型

20. 由于恒流源的电流恒定，因此等效的交流电阻________，而等效的直流电阻________。

A. 很大　B. 很小　C. 不太大　D. 等于零

21. 集成运放有________个输入端和________个输出端。

A. 1　B. 2　C. 3

22. 集成运放正常工作时，当其共模输入电压超过 U_{icmax} 时，集成运放将________，当其差模输入电压超过 U_{idmax} 时，集成运放________。

A. 不能正常放大差模信号　B. 输入级放大管将击穿

23. 直接耦合放大电路输入级采用差分放大电路是为了________。

A. 放大变化缓慢信号　B. 放大共模信号　C. 抑制温漂

24. 对于长尾式差分放大电路，在差模交流通路中，射极电阻 R_E 可视为________。

A. 开路　B. 短路　C. $2R_E$

25. 两个 β 相同的晶体管组成复合管后，其电流放大系数约为________。

A. β　B. 2β　C. β^2

26. OCL 电路中，输出功充最大时________。

A. 输出电压幅值最大

B. 功放管管耗最大

C. 电源提供的功率最大

27. 对功率放大器的主要要求有________________。

A. U_o 高　B. P_o 大　C. 效率高　D. R_i 大

E. 波形不失真

28. 当集成运放线性工作时，两条分析依据为________。

A. $U_-=U_+$　B. $I_-=I_+=0$　C. $U_o=U_i$　D. $A_u=1$

29. LM386 是集成功率放大器，它可以使电压放大倍数在________变化。

A. 0～20　B. 20～200　C. 200～1000

30. 通用型集成运放的输入级多采用________，中间级多采用________，输出级多采用________。

A. 共射放大电路　B. 差分放大电路　C. OCL 电路　D. OTL 电路

31. 集成运放的互补输出级采用________。

A. 共射接法　B. 共基接法　C. 共集接法　D. 差分电路

其原因是________。

A. 频带宽　B. 放大电压的能力强　C. 带负载能力强　D. 输入电阻大

32. 集成运放的 A_{od} 越大，表示________；K_{CMR} 越大，表示________。

A. 最大共模输入电压越大　B. 抑制温漂能力越强

C. 最大差模输入电压越大　D. 对差模信号的放大能力越强

33. 集成运放的输入失调电压 U_{io} 是________，失调电流 I_{io} 是________。

A. 使输出电压为零在输入端所加补偿电压

B. 两个输入端电位之差

C. 两个输入端静态电流之和

D. 两个输入端静成电流之差

它们的数值越大，说明集成运放________。

A. 输入级参数对称性差　B. 放大差模信号能力差

C. 高频特性差　D. 最大共模输入电压大

34. 通用型集成运放上限截止频率很低的原因是________。

A. 结电容很多　B. 大阻值电阻很多　C. 没有耦合电容　D. 没有电感

35. 引入并联负反馈，可使放大器的________。

A. 输出电压稳定

B. 反馈环内输入电阻增加

C. 反馈环内输入电阻减小

36. 直接耦合放大器的低频特性比阻容耦合放大器的________。

A. 好　B. 差　C. 相同

37. 工作在线性区的运算放大器应置于________状态。

A. 深度反馈　　B. 开环　　C. 闭环

38. 产生正弦波自激振荡的稳定条件是________。

A. 引入正反馈　　B. $|AF|\geqslant 1$　　C. $AF=1$

39. 选择合适的交流负反馈组态(即反馈方式)满足放大电路性能要求。交流负反馈的4种组态为

A. 电压串联　　B. 电压并联　　C. 电流串联　　D. 电流并联

(1) 为了增大输入电阻、减小输出电阻,应在放大电路中引入________交流负反馈。

(2) 为了获得稳定的电流放大倍数,应在放大电路中引入________交流负反馈。

(3) 为了减小从信号源索取的电流,并得到稳定的输出电流,应在放大电路中引入________交流负反馈。

(4) 为了实现电流—电压的转换,应在放大电路中引入________交流负反馈。

40. 负反馈放大电路的自激振荡产生在________。

A. 中频段　　B. 高频段或低频段

41. 负反馈放大电路产生自激振荡的原因是________。

A. $\dot{A}\dot{F}=1$　　B. $|\dot{A}\dot{F}|>1$　　C. $\phi_A+\phi_F=(n+1)\pi$

42. 振荡器的输出信号最初是由________而来的。

A. 基本放大器　　B. 选频网络　　C. 干扰或噪声信号

43. 放大电路的级数越多,引入的负反馈越强,电路越________。

A. 容易产生自激振荡　B. 稳定

因此,实用放大电路多采用________。

A. 一级　　B. 三级　　C. 三级以上

44. 阻容耦合放大电路和耦合电容、旁路电容越多,电路越容易产生________。

A. 高频振荡　　B. 低频振荡

45. 现有电路如下。

A. 反相比例运算电路　B. 同相比例运算电路　C. 积分运算电路　D. 微分运算电路　E. 过零比较器　F. 滞回比较器　G. 低通滤波器　H. 高通滤波器　I. 带通滤波器　J. 带阻滤波器

根据下列要求,分别选择一个电路填入空内。

(1) 为了得到电压放大倍数为100的放大电路,应选用________。

(2) 为了得到电压放大倍数为−50的放大电路,应选用________。

(3) 为了将正弦波电压变换为相位与之相对应的方波电压,应选用________。

(4) 为了将方波电压变换为三角波电压,应选用________。

(5) 为了将三角波电压变换为方波电压,应选用________。

(6) 为了防止50Hz的电网电压干扰,应在电路中加________。



(7) 为了使10～15kHz信号顺利放大，应在放大电路中加________。

(8) 为了在信号电压中提取直流分量，应选用________。

46. 现有电路如下。

A. RC 正弦波振荡电路　B. LC 正弦波振荡电路　C. 石英晶体正弦波振荡电路

(1) 为了获得频率为10kHz的正弦波电压，应选用________。

(2) 为了获得频率为2MHz的正弦波电压，应选用________。

(3) 为了获得频率极其稳定的正弦波电压，应选用________。

47. RC 串并联网络在 $f=f_0=\frac{1}{2\pi RC}$ 时呈________。

A. 感性　　B. 阻性　　C. 容性

48. 在桥式(文氏桥)RC 正弦波振荡电路中，________。

A. $\phi_A=-180°$，$\phi_F=+180°$　　B. $\phi_A=+180°$，$\phi_F=+180°$

C. $\phi_A=0°$，$\phi_F=0°$

49. LC 并联选频网络在产生谐振时呈________。

A. 感性　　B. 阻性　　C. 容性

50. 理想的 LC 并联选频网络在产生谐振时电抗为________。

A. 零　　B. 不能确定　　C. 无穷大

51. 从结构上来看，正弦振荡电路是一个________。

A. 有输入信号的负反馈放大器

B. 没有输入信号的带选频网络的正反馈放大器

C. 没有输入信号的不带选频网络的正反馈放大器

52. 对频率稳定度要求较高的振荡器，要采用________。

A. LC 振荡电路　　B. RC 振荡电路　　C. RL 振荡电路　　D. 石英晶体振荡电路

53. 在忽略石英晶体振荡器自身损耗时，其在产生串联谐振或并联谐振时呈________。

A. 感性　　B. 阻性　　C. 容性

54. 在产生串联谐振时电抗为________，在产生并联谐振时电抗为________。

A. 零　　B. 不能确定　　C. 无穷大

55. 单相桥式整流电容　波电路输出电压平均在 $U_o=$________U_2。

A. 0.45　　B. 0.9　　C. 1.2

56. 测量脉冲电压(例如尖脉冲)的峰值应使用________。

A. 交流毫伏表　　B. 直流电压表　　C. 示波器

四、计算与分析题

1. 试用电流方程式计算室温下正向电压为0.26V和反向电压为1V时的二极管电流。(设 $I_S=10\mu A$)。

2. 写出图11.1所示各电路的输出电压值，设二极管均为理想二极管。



3. 设图 11.2 中的二极管均为理想的(正向可视为短路，反向可视为开路)，试判断其中的二极管是导通还是截止，并求出 A、Q 两端电压 U_{AO}。

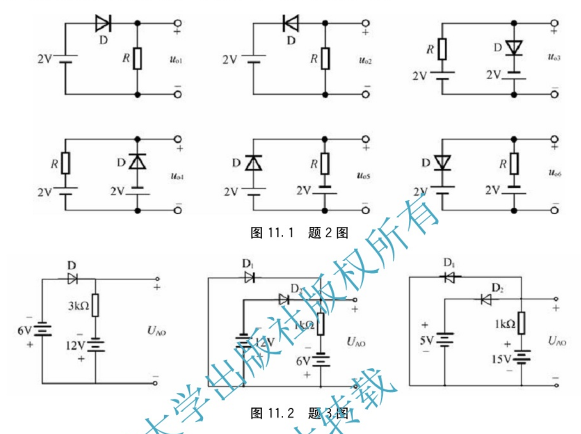


图 11.1　题 2 图

图 11.2　题 3 图

4. 电路如图 11.3 所示，已知 $u_i=6\sin\omega t$(V)，试画出 u_i 与 u_o的波形，并标出幅值。分别使用二极管理想模型和恒压降模型($U_D=0.7$V)

5. 电路如图 11.4 所示，已知 $u_i=6\sin\omega t$(V)，二极管导通电压 $U_D=0.7$V。试画出 u_i 与 u_o的波形，并标出幅值。

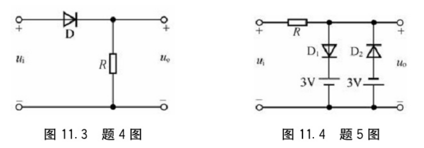


图 11.3　题 4 图　　　图 11.4　题 5 图

6. 现有两只稳压管，它们的稳定电压分别为 5V 和 8V，正向导通电压为 0.7V。试问

(1) 若将它们串联相接，则可得到几种稳压值？各为多少？

(2) 若将它们并联相接，则又可得到几种稳压值？各为多少？

7. 已知稳压管的稳压值 $U_Z=6$V，稳定电流的最小值 $I_{Zmin}=5$mA。求图 11.5 所示电路中 U_{o1}和 U_{o2}各为多少伏。

8. 电路如图 11.6(a)、(b)所示，稳压管的稳定电压 $U_Z=3$V，R 的取值合适，u_i的波形如图 11.6(c)所示。试分别画出 u_{o1} 和 u_{o2}的波形。



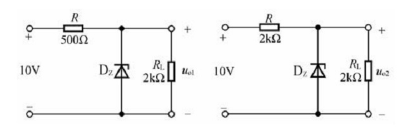


图 11.5 题 7 图

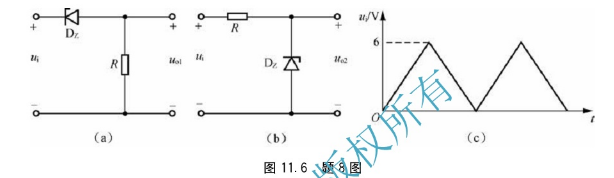


图 11.6 题 8 图

9. 电路如图 11.7 所示，设所有稳压管均为硅管(正向导通电压为 $U_D=0.7V$)，且稳定电压 $U_Z=8V$，已知 $u_i=15\sin\omega t$ (V)，试画出 u_{o1} 和 u_{o2} 的波形。

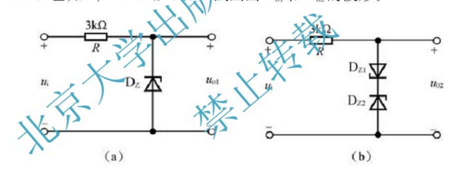


图 11.7 题 9 图

10. 一个如图 11.8(a)所示的共发射极放大电路中的晶体管具有如图 11.8(b)所示的输出特性，静态工作点 Q 和直流负载线已在图上标出(不包含加粗线)。

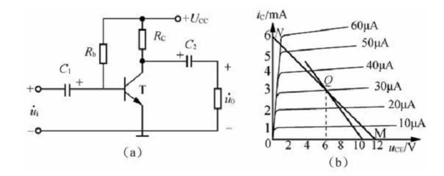
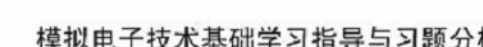


图 11.8 题 10 图

(1) 确定 U_{CC}、R_C 和 R_b 的数值(设 U_{BE} 可以略去不计)。

（2）若接入 $R_L=6\text{k}\Omega$，画出交流负载线。

（3）若输入电流 $i_b=18\sin\omega t(\mu\text{A})$，在保证放大信号不失真的前提下，为尽可能减小直流损耗，应如何调整电路参数？调整后的元件数值可取为多大？

11. 放大电路如图 11.9(a)所示，其晶体管输出特性曲线如图 11.9(b)所示(不包含加粗线和细的输出电压波形线)，已知

$R_{b1}=550\text{k}\Omega$，$R_c=3\text{k}\Omega$，$R_L=3\text{k}\Omega$，$U_{CC}=24\text{V}$，$R_{e1}=0.2\text{k}\Omega$，$R_{e2}=0.3\text{k}\Omega$，$\beta=100$（各电容容抗可忽略不计），$U_{BE}=0.7\text{V}$。

（1）计算静态工作点。

（2）分别作出交直流负载线，并标出静态工作点 Q。

（3）若基极电流分量 $i_b=20\sin\omega t(\mu\text{A})$，画出输出电压 u_o 的波形图，并求其幅值 U_{om}。

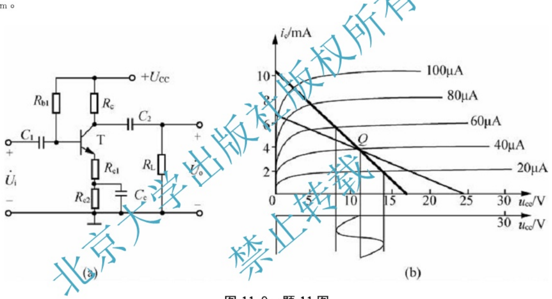


图 11.9 题 11 图

12. 分压式偏置电路如图 11.10(a)所示，其晶体管输出特性曲线如图 11.10(b)所示，电路中元件参数 $R_{b1}=15\text{k}\Omega$，$R_{b2}=65\text{k}\Omega$，$R_c=3\text{k}\Omega$，$R_L=3\text{k}\Omega$，$U_{CC}=24\text{V}$，$R_e=1\text{k}\Omega$，晶体管的 $\beta=50$，$r_{bb'}=200\Omega$，饱和压降 $U_{CES}=0.7\text{V}$，$r_s=100\Omega$。

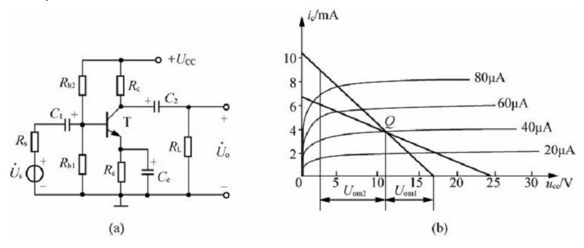


图 11.10 题 12 图



（1）估算静态工作点 Q。

（2）求最大输出电压幅值 U_{om}。

（3）计算放大器的 A_u、R_i、R_o和 A_{us}。

13. 用示波器观察图 11.11(a)所示电路中的集电极电压波形时，如果出现图 11.11(b)所示的 3 种情况，试说明各是哪一种失真？应该调整哪些参数以及如何调整才能使这些失真分别得到改善？

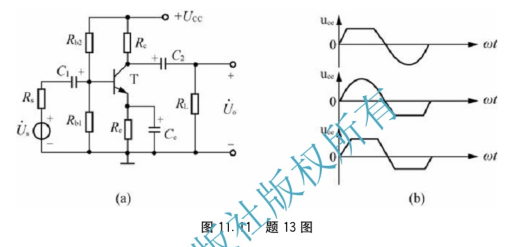


图 11.11　题 13 图

14. 在如图 11.12 所示电路中，设 $U_{CC}=12\text{V}$，$R_c=R_L=3\text{k}\Omega$，晶体管的 $\beta=50$，$r_{bb'}=300\Omega$，在计算 I_{BQ}时可认为 $U_{BE}\approx 0$，求：

（1）若 $R_b=600\text{k}\Omega$，问这时的 $U_{CEQ}=$？

（2）在以上情况下，逐渐加大输入正弦信号的幅度，问放大器易出现何种失真？

（3）若要求 $U_{CEQ}=6\text{V}$，问这时的 $R_b=$？

（4）在 $U_{CEQ}=6\text{V}$ 时，加入$|\dot{U}_i|=5\text{mV}$ 的信号电压，问这时的$|\dot{U}_o|=$？

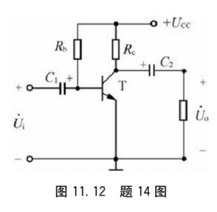


图 11.12　题 14 图

15. 放大电路如图 11.13 所示，$U_{CC}=12\text{V}$，$R_{b1}=15\text{k}\Omega$，$R_{b2}=45\text{k}\Omega$，$R_c=R_L=6\text{k}\Omega$，$R_{e1}=200\Omega$，$R_{e2}=2.2\Omega$，晶体管的 $\beta=50$，$r_{bb'}=300\Omega$，$U_{BE}=0.6\text{V}$，各电容容抗可以略去不计。

（1）估算静态工作点（$I_{CQ}=$？$U_{CEQ}=$？）。

（2）画出其简化的 H 参数等效电路，并计算出电压放大倍数 A_u，输入电阻 R_i，输出电阻 R_o。

（3）设信号源内阻 $R_s=1\text{k}\Omega$，信号源电压$|\dot{U}_s|=10\text{mV}$，计算输出电压$|\dot{U}_o|$。

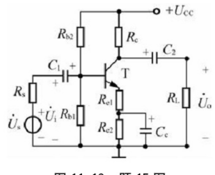


图 11.13　题 15 图

16. 某射极输出器用一个恒流源来设置射极电流，如图 11.14 所示，已知晶体管的 $\beta=100$，$U_{BE}=0.7V$，$r_{bb'}=300\Omega$，电容 C_1、C_2 在交流通路中可视为短路。

(1) 求静态时的 I_{CQ} 和 U_{CEQ}。

(2) 求射极输出器的输出电阻 R_o。

(3) 若 $R_L=\infty$，求输入电阻 R_i 和源电压放大倍数 A_{us}。

(4) 若 $R_L=110\Omega$，求输入电阻 R_i 和源电压放大倍数 A_{us}。

(提示：恒流源的特点为交流电阻极大，而直流电阻较小。)

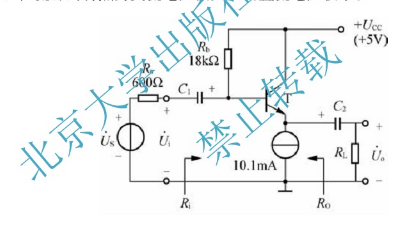


图 11.14　题 16 图

17. 在图 11.15 所示电路中，晶体管的 $\beta=100$，$r_{bb'}=0$，$U_{BE}=0.7V$，电容 C_1、C_2 和 C_3 都足够大。

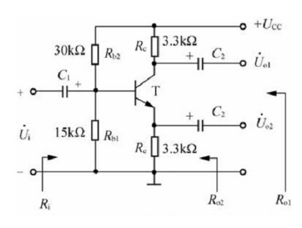


图 11.15　题 17 图

(1) 求放大器静态工作点 I_{CQ}、I_{BQ}、U_{CEQ}。

(2) 求放大器电压放大倍数$\dot{A}_{u1}$和$\dot{A}_{u2}$。

(3) 求放大器输入电阻 R_i。

(4) 求放大器输出电阻 R_{o1}、R_{o2}。

18. 射极输出器如图 11.16 所示，已知 $\beta=50$，晶体的饱和压降 U_{CES}和穿透电流 I_{CEO}在 R_L'上的压降均可忽略不计。

(1) 求射极跟随器的电压跟随范围。

(2) 改变 R_b可调整跟随范围，当 R_b为何值时跟随范围最大?

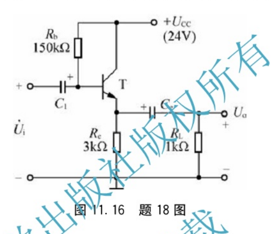


图 11.16 题 18 图

19. 设计一个比例运算电路，要求输入电阻 $R_i=20\text{k}\Omega$，比例系数为-100。

20. 请用集成运放实现如下运算，并简述工作原理。

(1) $u_o=3u_i$；(2) $u_o=u_{i1}+u_{i2}$。

21. 将集成运放连接成如图 11.17 所示的电路形式，问输出电压与输入电压之间有怎样的关系?

22. 请用集成运入构成加法电路，使之实现运算关系：$u_o=2u_{i1}+3u_{i2}+5u_{i3}$。

23. 有加法运算电路如图 11.18 所示，求输出电压与各输入电压之间的函数关系。

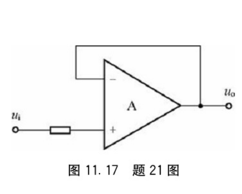


图 11.17 题 21 图

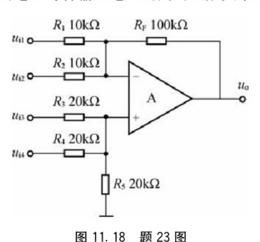


图 11.18 题 23 图

24. 有如图 11.19 所示电路，问

(1) 若 $u_{i1}=0.2\text{V}$，$u_{i2}=0\text{V}$，$u_o=$?



(2) 若 $u_{i1}=0V$，$u_{i2}=0.2V$，$u_o=$？

(3) 若 $u_{i1}=0.2V$，$u_{i2}=0.2V$，$u_o=$？

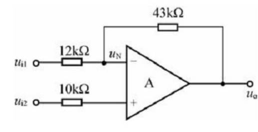


图 11.19　题 24 图

25. 电路如图 11.20 所示，试求

(1) 输入电阻。

(2) 比例系数。

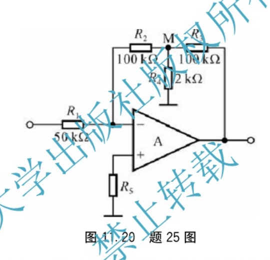


图 11.20　题 25 图

26. 试求图 11.21 所示各电路输出电压与输入电压的运算关系式。

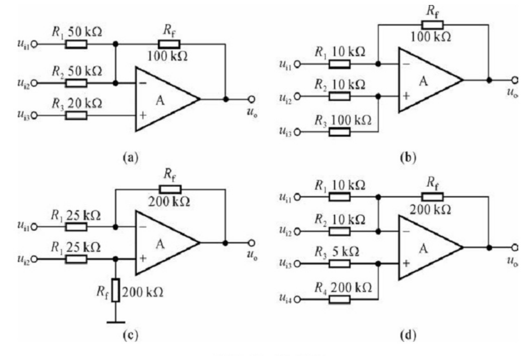


图 11.21　题 26 图



27. 有如图 11.22 所示电路，请写出输出信号与输入信号的函数关系式。

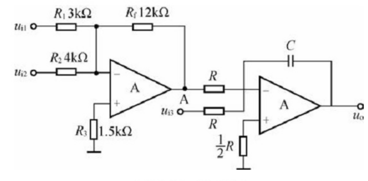


图 11.22 题 27 图

28. 请写出图 11.23 所示的两个电路中输出电压与输入电压之间的关系，并指出平衡电阻 R_6 应取多大值。

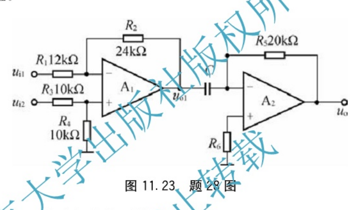


图 11.23 题 28 图

29. 试求解图 11.24 所示电路的运算关系。

30. 电路如图 11.25 所示，试推导输出电流 i_L 与输入电压 u_i 的关系。

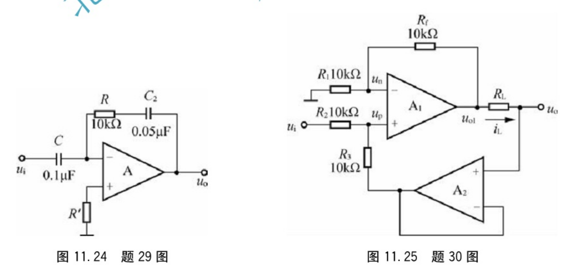


图 11.24 题 29 图　　图 11.25 题 30 图

31. 在图 11.26 所示电路中，正常情况下 4 个桥臂电阻均为 R。当某个电阻因受温度或应变等非电量的影响而变化 ΔR 时，电桥平衡即遭破坏，输出电压 U_o 反映非电量的大小。设 $R_1 \gg R$，试证明。



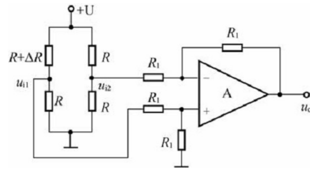


图 11.26　题 31 图

32. 图 11.27 所示是一基准电压电路，u_o 可作基准电压用，求 u_o 的调节范围。

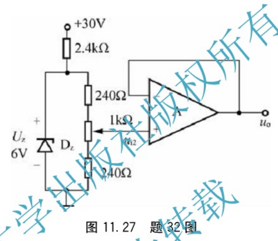


图 11.27　题 32 图

33. 图 11.28 所示为恒流源电路，已知稳压管工作在稳压状态，试求负载电阻中的电流。

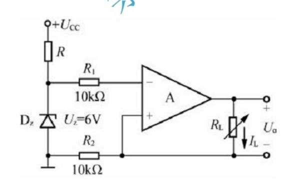


图 11.28　题 33 图

34. 如图 11.29 所示是一电压比较器，已知集成运放的开环电压增益无穷大，双向稳压管的稳定电压是±6V，请画出它的传输特性曲线，并指出输入一个幅度值为 4V 的正弦信号时，输出信号将是怎样的波形？

35. 电路如图 11.30 所示，运算放大器的最大输出电压 $U_{opp}=\pm12$V，稳压管的稳定电压 $U_z=6$V，其正向压降 $U_D=0.7$V，$u_i=12\sin\omega t$(V)。参考电压 $U_R=3$V 和－3V 两种情况下，试画出传输特性和输出电压 u_o 的波形。



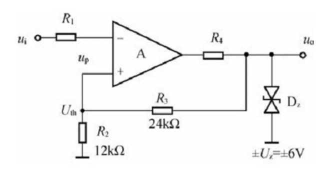


图 11.29　题 34 图

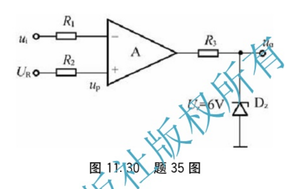


图 11.30　题 35 图

36. 某电子设备要求 15V 直流电压，负载电阻 $R_L=50\Omega$，试问

（1）若选用单相桥式整流电路，则电源变压器副边电压有效值 U_2 应为多少？整流二极管正向平均电流 $I_{D(AV)}$ 和最大反向电压 U_{RM} 各为多少？

（2）若改用单相半波整流电路，则 U_2、$I_{D(AV)}$ 和 U_{RM} 各为多少？